

## EVALUACIÓN DE ESTRUCTURA DE PUENTE SOMETIDA A LA ACCIÓN DE EXPLOSIONES PARA EXPLOTACIÓN DE CANTERAS

Peralta, María Haydée<sup>1</sup>; Ercoli, Norma Luján<sup>1</sup>; Gerbaudo, Carlos<sup>2</sup>  
Ingenieros Civiles. 1. Facultad de Ingeniería, UNCPBA.  
2. Facultad de Ingeniería. UNC, INGROUPO-Oficina de Proyectos.  
E-mail: mperalta@fio.uncen.edu.ar

### RESUMEN

El presente trabajo corresponde a la evaluación estructural de un puente con tablero superior de vigas pretensadas de 32 metros de luz simplemente apoyadas 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.

La estructura del puente estará sometida a efectos dinámicos originados por explosiones para la explotación de una cantera próxima, por lo que en el proyecto han sido consideradas fuerzas inerciales originadas por las voladuras para la verificación de la estabilidad del macizo rocoso en el que apoya el puente, teniendo en cuenta que las voladuras son del tipo “controladas” de acuerdo a criterios de USBM (United States Bureau of Mines) para la preservación de la zona de fundaciones.

Las evaluaciones estáticas y dinámicas se detallan en el presente trabajo. La evaluación dinámica permitió observar la importancia del estricto control de las voladuras, para asegurar el cumplimiento de lo establecido por USBM, en cuanto a los límites de velocidades para los rangos de frecuencias correspondientes para preservar a la estructura de posibles daños. Asimismo, se destaca la importancia de efectuar un monitoreo permanente de todos los elementos de la estructura y del macizo rocoso.

### ABSTRACT

*This is a top board bridge; Type A30, with prestressed beams of 32 meters span simply supported on reinforced concrete, based on the rock mass, and located 20 meters above of the quarry. Because of the installation site, structure will be subjected to dynamic effects caused by blasting.*

*In the project, it have been considered inertial forces caused by blasting for the verification of the stability of the rock mass at the construction site, computed for controlled blasting, according to USBM for preserving the foundation area.*

*Static and dynamic assessments will be detailed in the present work. The dynamic evaluation allowed us to observe the importance of strict blasting control to ensure compliance with the USBM, regarding speed limits for the frequency ranges corresponding to preserve the structure from damage. It also stresses the importance of conducting ongoing monitoring of all elements of the bridge structure and the rock mass.*

## INTRODUCCIÓN

Las vibraciones generadas durante el proceso de voladura en la explotación de canteras inducen deformaciones y sollicitaciones 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.

El daño es función de la frecuencia de vibración transmitida y del tipo de construcción pudiendo existir valores de desplazamientos y deformaciones excesivos e incluso peligro de resonancia para bajas frecuencias.

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 en el marco que establecen los criterios establecidos por USBM (United States Bureau of Mines) para la preservación de la estructura frente a dichas acciones.

La estructura evaluada es un puente de tablero superior 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. Para las múltiples vigas pretensadas la calidad del hormigón es H-42 (CIRSOC 201, 2005<sup>1</sup>) se encuentran 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, diseñados para la categoría A30 de las Bases para el Cálculo de Puentes de Hormigón Armado de la Dirección Nacional de Vialidad<sup>2</sup>. En Figura 1 se muestra una vista general del puente en la etapa constructiva.

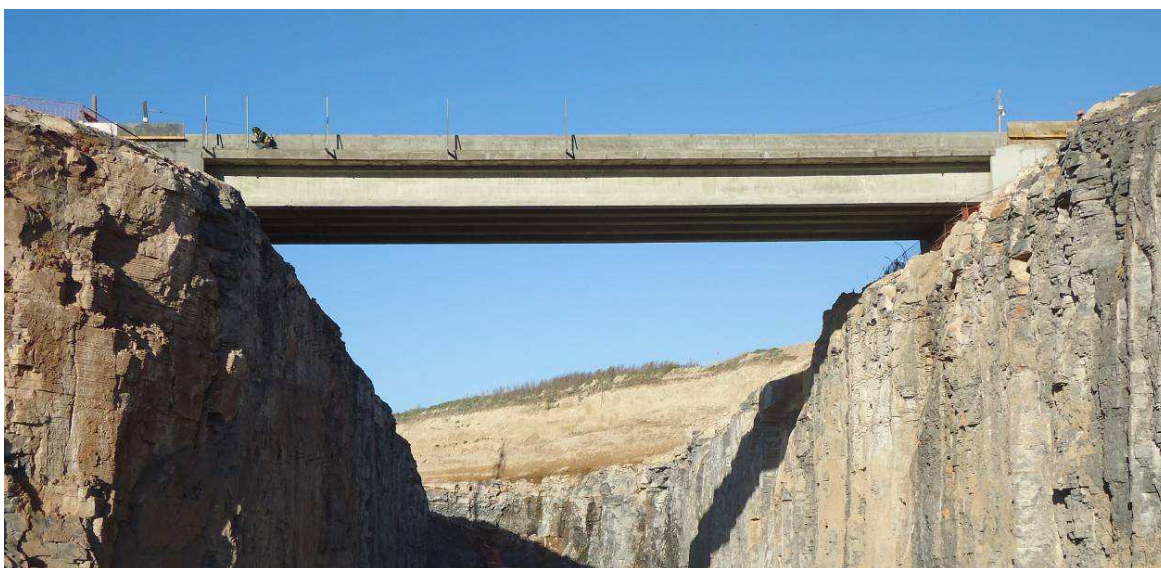


Figura 1. Vista general del puente

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<sup>3</sup>) 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.

Una vez construido el puente se programaron y efectuaron evaluaciones estáticas y dinámicas in situ, previa evaluación numérica computacional a efectos de verificar las condiciones de diseño previstas. Las evaluaciones estáticas se efectuaron a través de la prueba de carga mientras que las evaluaciones dinámicas comprendieron determinación de las frecuencias y amplitudes vibratorias en tablero y estribos. 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<sup>4</sup>, y el análisis dinámico a través de la evaluación de frecuencias y modos naturales de vibración (Peralta, et al, 2008<sup>5</sup>). A continuación se describen las metodologías para ambos casos.

### **2.1 Evaluaciones Estáticas**

#### **2.1.1 Prueba de carga**

Como es habitual, 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 INGROUP, 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 del modelo numérico del puente.
- ii) La deformación remanente para un ciclo de carga y descarga.
- iii) La capacidad para resistir sin daño las sollicitaciones máximas normales de la estructura.

La prueba de carga estática se realizó con cuatro 4 (cuatro) camiones cargados con material granular que fueron pesados en condición sin carga (tara) y con máxima carga (peso total).

De acuerdo al protocolo de la Prueba de Carga se efectuó la medición de desplazamientos o flechas en las instancias de escalones de carga y descarga inmediatamente de cargada o descargada la estructura y cada 5 minutos hasta la estabilización de las deformaciones y/o recuperación de las mismas.

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 (1er. Escalón de carga)



Figura 3: Instancia de la Prueba de Carga con 4 camiones (2do. Escalón de carga)

### 2.1.2 Análisis Numérico

Se calculó la flecha máxima en el centro del tablero, ajustando la indicada en el Protocolo de Prueba de Carga a 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 emparrillado plano 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. Se representaron mediante resortes elásticos los aparatos de apoyo de neopreno y se consideraron 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 (dos) ejes duales traseros del camión y un (un) eje simple delantero.

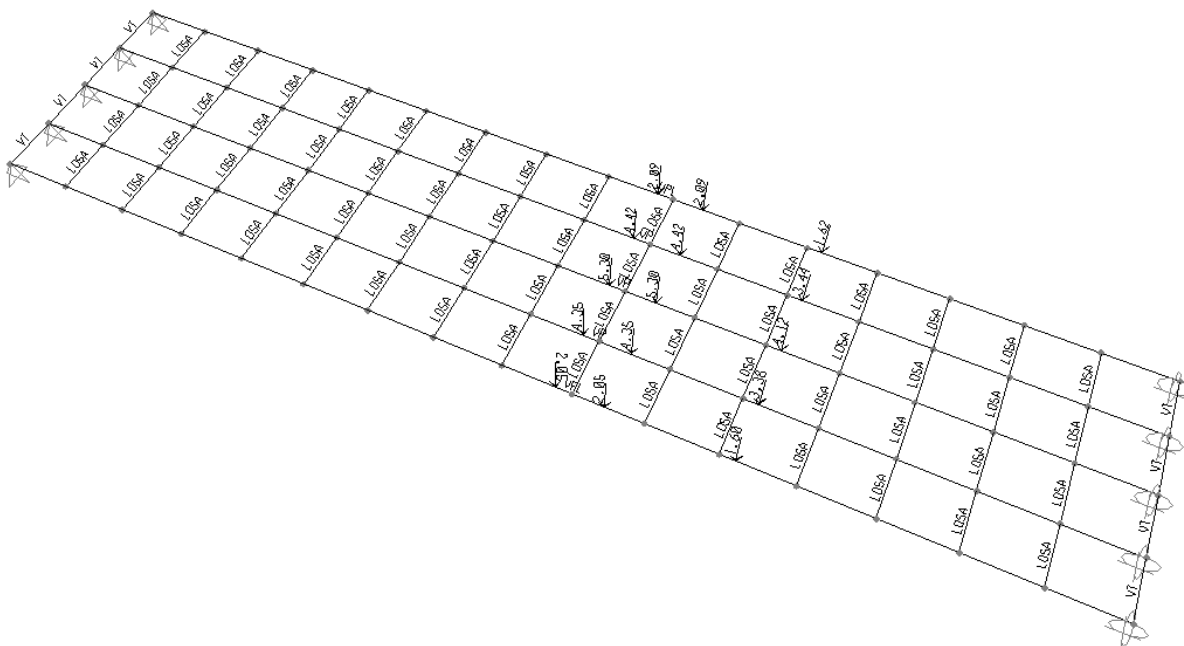


Figura 4: Modelo numérico para evaluación estática

## 2.2 Evaluaciones Dinámicas

### 2.2.1 Criterios de USBM

El United States Bureau of Mines establece límites permitidos en términos de velocidades para estructuras a efectos de mantener un comportamiento en servicio seguro. Se desarrollaron criterios de control de vibraciones por voladura para las estructuras residenciales en los que el valor del umbral de daño es función de las frecuencias de vibración. En el presente trabajo se toman como referencia los criterios desarrollados por USBM, United States Department Bureau of Mines. En

los mismos se toman rangos de frecuencia con discontinuidades para establecer las velocidades de vibración límites. Estos límites fueron determinados a partir de numerosos estudios experimentales cuyos resultados fueron analizados estadísticamente posibilitando arribar a los mencionados límites.

Las velocidades límites son menores para las frecuencias más bajas, según se indica en Figura 5.

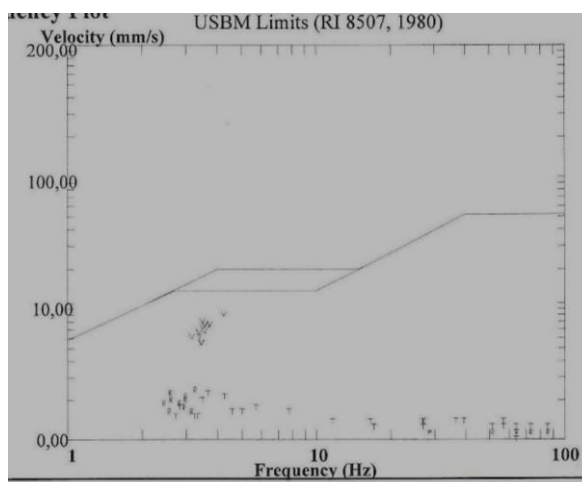


Figura 5: Límites de Velocidad en función de a frecuencia (criterio USBM)

### 2.2.2 Análisis Numérico

Se efectuó el análisis dinámico utilizando el modelo numérico del tablero del puente indicado en Figura 4 calibrado con la carga estática aplicada y deformaciones medidas durante la ejecución de la Prueba de Carga del Puente, según resultados del 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 directa relación con la rigidez de la estructura, podrán ser utilizadas, mediante su evaluación experimental, en el futuro para el control del comportamiento en servicio del puente (Clough y Penzien, 1993<sup>6</sup>).

### 2.2.3 Evaluación dinámica 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 longitudinal 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 de respuesta 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 1 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 calculada máxima
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 1. Cálculo de flechas máximas medidas y calculadas en el centro del tablero

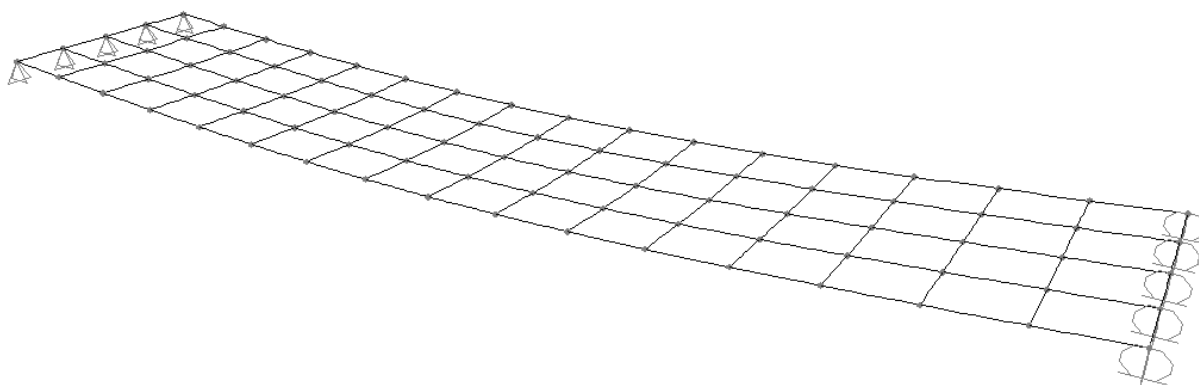


Figura 7: Evaluación estática-Deformada del tablero

### 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 2 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
4	1er Flexión Vertical Longitudinal	0.243	4.12
5	1er. Torsión Transversal	0.225	4.45
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 2. 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.

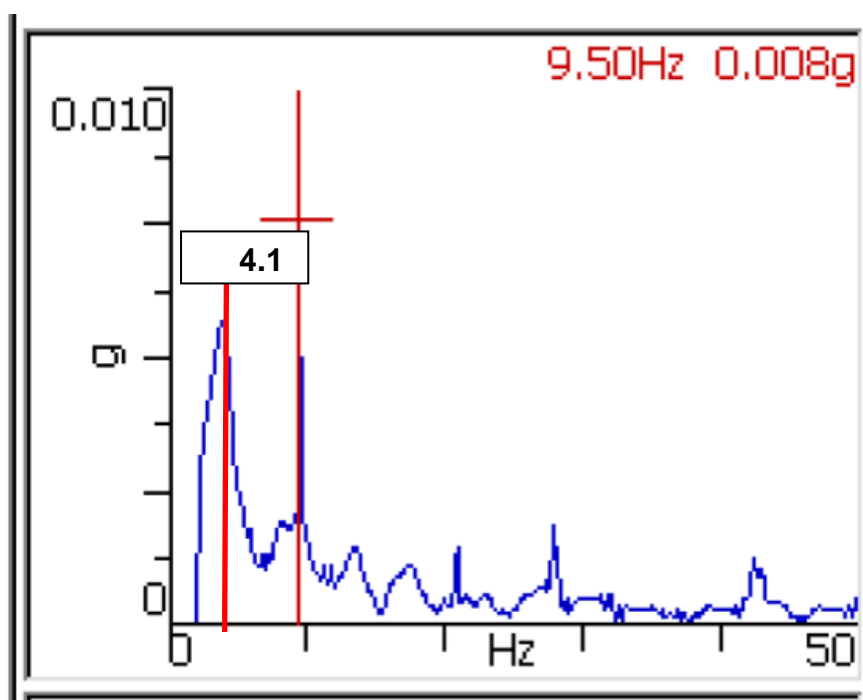


Figura 8: Espectro de frecuencia del sensor 1V

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.

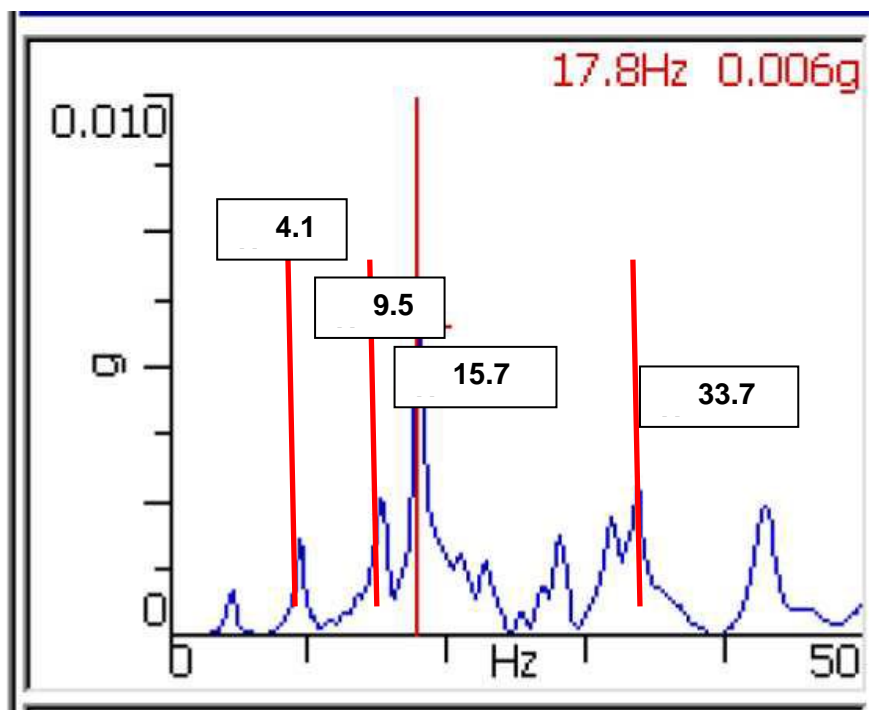


Figura 9: Espectro de frecuencia del sensor 4V

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 de USBM tomados como referencia, para el rango de frecuencias medidos.

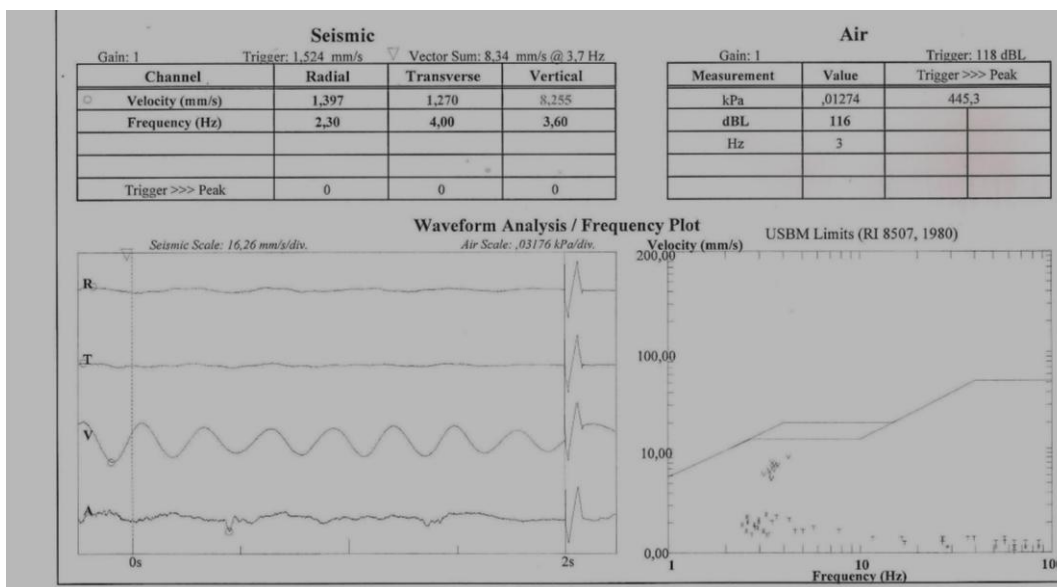


Figura 10: Espectro de frecuencia del sensor 4V

## 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 4.1 De la Evaluación Estática

Las flechas medidas y calculadas se resumen en la Tabla 1, 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 numéricamente, 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 los criterios de USBM, según se observa en el ejemplo de la Figura 10 donde los puntos registrados de velocidad se encuentran en todos los casos por debajo de dichos límites admisibles.

## 5. MONITOREO DEL PUENTE

A efectos de asegurar que el comportamiento estructural de cada una de las componentes de la estructura es adecuado y/o detectar de manera temprana algún índice de daño, durante su vida útil, se redactó el Manual de Mantenimiento del Puente.

Particularmente se pretende asegurar:

1. Mantener un nivel apropiado de seguridad del puente en servicio
2. Contribuir a lograr un alto nivel de paso es decir que se pueda circular sin restricciones de carga o de volumen
3. Lograr un mantenimiento racional y económico

Al efecto se planificaron las Inspecciones y el Programa de Control. Las inspecciones comprenden Inspecciones de rutina, principales y especiales. Las primeras se realizan en intervalos cortos de tiempo y se pretende detectar cambios y/o daños que surjan. Las principales se refieren a inspecciones más detalladas de cada uno de los elementos a la vista y se efectuarán cada 2 a 5 años. Las inspecciones especiales abarcan ensayos y medición de elementos y se realizan cuando hayan sido determinados para realizar periódicamente o cuando surjan de las inspecciones principales o luego de accidentes, condiciones climáticas extremas o circunstancias especiales de operación.

Dentro de las inspecciones especiales se encuentra la medición de vibraciones del tablero tomando las posibles variaciones de las frecuencias de vibración como índice de daño a investigar.

Se establecen también en el Manual las operaciones de mantenimiento necesarias para asegurar una adecuada vida en servicio.

## 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 deformaciones 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 de los criterios establecidos por USBM ya que las consideraciones de estabilidad tanto del puente como del macizo de fundación fueron asumidas en el contexto de cumplimiento de dichos criterios. Para ello es determinante el control de las voladuras.

Por otro lado es fundamental el estricto cumplimiento de lo establecido en el Manual de Mantenimiento para lograr un comportamiento seguro durante la vida útil.

## REFERENCIAS

INTI-CIRSOC, CIRSOC 201, 2005

Dirección Nacional de Vialidad, Bases para el Cálculo de Puentes de Hormigón Armado, 1952.

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.

Dirección Nacional de Vialidad, Pliego General de Condiciones y Especificaciones Técnicas más Usuales, Edición 1998.

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.

Clough, R. W. and Penzien, J. Dynamics of Structures. Second Edition, McGraw-Hill, Inc. 1993.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección de Ingeniería de la Empresa Cementos Avellaneda SA, por facilitar el uso de datos e información contenida en el presente trabajo.