

Análisis y evaluación del comportamiento estructural de dos puentes ubicados sobre Ruta Nacional N° 9.

Mario W. E. Toledo¹ Ricardo D. Quinteros² & Gustavo Pérez³

(1) *Facultad de Ingeniería, Consejo de Investigación, Universidad Nacional de Salta.*
mwtoledo@unsa.edu.ar

(2) *INIQUI-CONICET, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta;*
rdquinteros@hotmail.com

(3) *Instituto de Estructuras “Ing. Arturo M. Guzmán”, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán.*
gperez@herrera.unt.edu.ar

RESUMEN: El presente trabajo se enmarca en el Proyecto PICTO-SISMO N° 251 que se realiza en forma conjunta entre el Instituto de Estructuras de la UNT y el Instituto de Ingeniería Civil y Medio Ambiente de Salta de la UNSa. Los objetivos planteados en este proyecto contemplan la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes ubicados en zonas de alta peligrosidad sísmica, como es el caso de los puentes “Gobernador del Campo” y “Ferrocarril Mitre” ubicados sobre Ruta Nacional N° 9 Avenida de Circunvalación de la Ciudad de San Miguel de Tucumán. En esta primera etapa, se realizó un estudio de campo a fin de evaluar la respuesta dinámica y estructural de los puentes mencionados basado en vibraciones ambientales. Además, se utilizó un georadar para verificar las armaduras y posibles discontinuidades u otras patologías en los elementos de hormigón armado. Se realizó una modelación tridimensional de los puentes y se contrastaron los valores experimentales obtenidos con los resultados numéricos, permitiendo la calibración del modelo propuesto.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción de los puentes estudiados

Los puentes que se estudian fueron construidos en la década del ochenta (Mendez et al, 2012). Uno de ellos, ubicado en la intersección de la Avda. Circunvalación y Avenida Gobernador del Campo (de allí su nombre), consta de dos tramos. El segundo está ubicado en la intersección del paso de las vías del Ferrocarril Mitre y la Avda. Circunvalación y consta de 7 vanos (Ver Fig. 1). La infraestructura está resuelta en hormigón armado y la superestructura en hormigón pretensado. Las Características geométricas se resumen en la Tabla 1.

Ambos puentes son sistemas compuestos integrados por dos secciones idénticas estructuralmente separadas (Méndez et al, 2012), por lo que pueden ser estudiadas de forma independiente. La superestructura del puente Gobernador del Campo es continua y post-tesada en sentido longitudinal, en tanto que, la del puente Ferrocarril Mitre se compone de 7 tramos simplemente apoyados con diafragmas transversales en cada apoyo. Las características geométricas de los mismos se muestran en las Fig. 2 y 3.



Figura 1: Ubicación de los puentes en la Ciudad de San Miguel de Tucumán.

Tabla 1. Características geométricas de los puentes estudiados.

Puente	Gobernador del Campo	Ferrocarril Mitre
Longitud [m]	52	168
N° tramos	2	7
Ancho [m]	11,2	11,2
Ángulo de esviaje	0	0
Altura de Pilas [m]	6,5	9,60

La sección transversal del Puente Gobernador del Campo se compone de dos vigas longitudinales principales de sección constante, vinculadas con vigas transversales ubicadas en los extremos de cada tramo (Fig. 4a). La sección transversal del Puente Ferrocarril se compone de cuatro vigas

doble T de sección constante, con macizamiento extremo sin continuidad estructural, las alas superiores de las vigas son solidarias con el tablero (Fig. 4b).

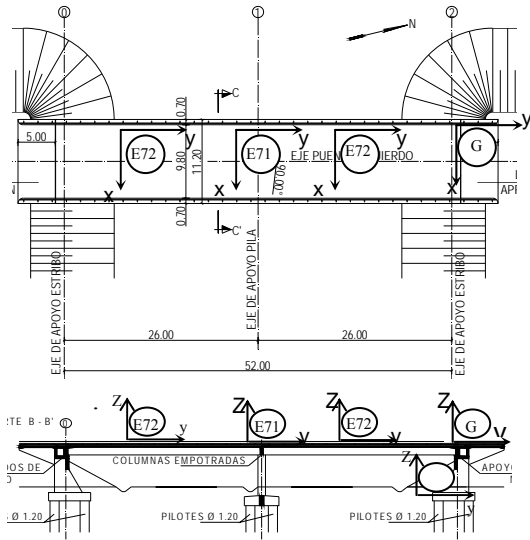


Figura 2. Puente Gobernador del Campo: ubicación de acelerómetros.

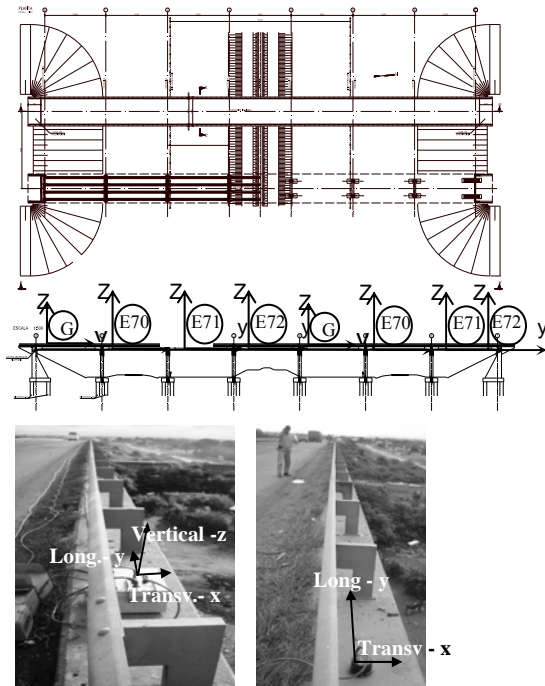


Figura 3: Puente Ferrocarril Mitre. Ubicación de acelerómetros

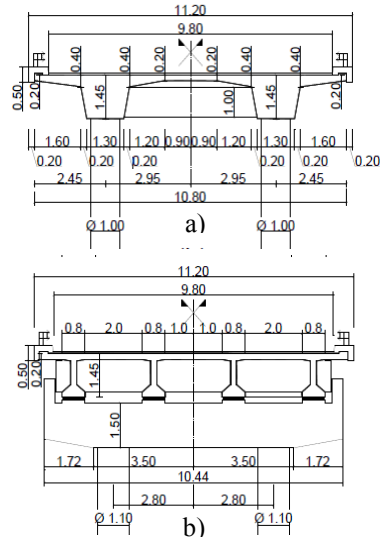


Figura 4: Sección transversal de los puentes: a) Gobernador del Campo b) Puente Ferrocarril Mitre

1.2 Determinación de las características dinámicas

A fin de evaluar la respuesta dinámica y estructural de los mencionados puentes, se realizó un estudio para determinar las frecuencias de vibración de la estructura, basadas en la utilización de vibraciones ambientales, medidas en diferentes puntos de los puentes.

En cada uno de los puentes estudiados, el procedimiento incluyó los siguientes pasos: a) Ensayo de vibración ambiental; b) Análisis modal: es decir extracción de los parámetros desde los datos experimentales de salida.

En general, para puentes se prefiere utilizar estudios de vibración ambiental frente a los de vibración forzada. Entre las ventajas de utilizar vibración ambiental se pueden mencionar: no es necesario utilizar equipos especiales de excitación; el ensayo implica un mínimo de interferencia con el uso normal de la estructura; los ensayos de vibración ambiental se han convertido en el principal método disponible para la evaluación del comportamiento dinámico de estructuras y han demostrado ser adecuados para sistemas flexibles tales como puentes colgantes (Brownjohn et al, 1992), puentes en general (Gentile et al, 2004; Toledo et al, 2007) y edificios de gran altura (Toledo et al, 2011; Kohan et al, 2008).

El equipo utilizado para los ensayos incluyó una registradora digital de doce canales, modelo K2 marca Kinemetrics (Kinemetrics Inc., 2002) y cuatro acelerómetros triaxiales de balance de fuerzas (Fig. 5). Cada sensor puede medir aceleraciones en tres direcciones ortogonales utilizando tres canales por acelerómetro. La sensibilidad de los mismos es de 1250 mV/g. La

estación registradora digital cuenta con un sistema de adquisición de datos, convertidor de señales (A/D), acondicionamiento de señal y almacenamiento de datos digitales. Para cada canal, los registros fueron realizados por períodos de 1800 seg., en intervalos de 0,005 seg, es decir con una velocidad de captura de 200 muestras por segundo lo cual implica un total de 360.000 puntos de datos. La señal convertida a digital y acondicionada fue almacenada en formato ASCII.

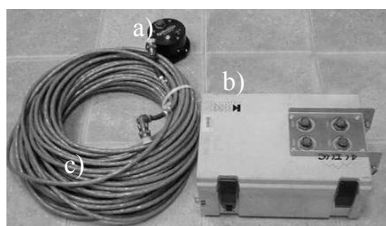


Figura 5: Equipo de medición. a) Acelerómetro triaxial de balance de fuerza; b) Registradora digital 12 canales K2; c) Cables conductores

A fin de capturar las principales frecuencias de vibración del puente se realizó una propuesta para la distribución de los acelerómetros sobre la superficie del tablero y estribos, tal como se muestra en las Fig. 2 y 3.

En el caso del Puente Gobernador del Campo, la estación adquirentora de datos identificada como G se ubicó en el extremo de la losa del tablero próxima a la losa de aproximación. Los sensores triaxiales de balance de fuerza identificados como E71 y E72 (Fig. 2) se colocaron sobre el tablero a la altura de la pila y en el centro del tramo, respectivamente. Adicionalmente, a fin de comparar las diferentes respuestas estructurales de la superestructura y la subestructura, se propuso colocar el acelerómetro E70 sobre el estribo al lado de la zona de apoyo de neopreno.

En el puente Ferrocarril Mitre (Fig. 3), a efectos de cubrir los siete tramos, se realizó un programa de cuatro mediciones, ubicando la estación G en el primer tramo y los acelerómetros E70, E71, E72 en los otros tramos y sobre las pilas correspondientes, como se aprecia en la Fig. 3.

En virtud de que ambos puentes se ubican sobre Ruta Nacional con elevado tránsito, se decidió realizar en todos los casos dos mediciones, una en hora pico (mayor tránsito) y otra en hora valle (menor tránsito). De esta manera es posible capturar todas las frecuencias sin la influencia de las frecuencias que usualmente se activan por la presencia de los vehículos.

1.3 Estudio con georadar

Las técnicas no destructivas resultan de gran utilidad. Existen un gran número de métodos que

pueden usarse para los análisis estructurales no invasivos tales como R-X, ultrasonido, rastreo por cable (una señal eléctrica inducida), monitoreo acústico, etc. Una herramienta útil a este fin es el Radar de Penetración de Suelos (GPR: *Ground Penetrating Radar*). Es un radar diseñado para penetrar objetos sólidos o visualmente opacos. Provee un método de prospección no invasivo y no destructivo que por medio de antenas de distintas frecuencias permite explorar la mayoría de los materiales sólidos, generando imágenes mediante el análisis de las ondas electromagnéticas reflejadas.

Como aplicación en el campo de la Ingeniería Civil se puede citar:

- Detección de las capas de pavimento, espesores y capas de compactación de carretera (Lahouar et al, 2008; Imposa et al, 2009).

- Detección de fallas bajo rutas o cerca de fundaciones de edificios.

- Detección de instalaciones subterráneas (agua, cloacas, gas, electricidad y comunicaciones, etc.)

- Detección de la composición de muros de edificios históricos y su espesor (Imposa et al, 2009; Maierhofer et al, 2001).

- Detección de armaduras en hormigón armado (Soutsos et al, 2001).

- Detección de patologías de edificios (humedades, grietas, etc.) (Dérobert et al., 2008).

El georadar basa su función en la emisión y propagación de ondas electromagnéticas en un medio cualquiera, con la posterior recepción de las reflexiones producidas en sus discontinuidades. Dependiendo de los parámetros electromagnéticos de esas discontinuidades, las ondas se reflejarán o no. Parámetros tales como la conductividad, permitividad dieléctrica y su permeabilidad a las ondas magnéticas están relacionados entre sí, por lo que sólo se define la permitividad dieléctrica al momento de la adquisición de datos, autodefiniéndose los restantes parámetros.

El equipo de georadar utilizado (Fig. 6) se compone de dos cuerpos, el emisor y receptor de las ondas electromagnéticas llamado antena, y el otro que tiene como función traducir la señal enviada por ésta y realizar el radargrama, llamado transductor.

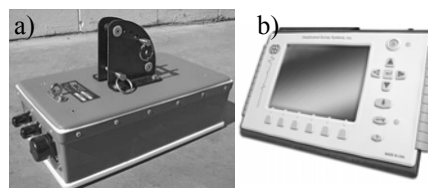


Figura 6: Equipo georadar: a) Antena de 900 MHz; b) Transductor

En la Tabla 2 se muestran las profundidades promedio que pueden alcanzar las distintas antenas, de acuerdo a su frecuencia media y por lo tanto su consiguiente aplicación:

Tabla 2. Características de las antenas

Frecuencia [MHz]	Aplicaciones	Profundidad promedio [m]
2600	H° estructural, carreteras, puentes	0.3
1600		0.5
900	H°, Geología superficial	1
400	Geología sup., medioambiente, Arqueología	3
200	Geología, medioambiente	8
100		20

Los parámetros electromagnéticos de un material, al ser atravesado por una onda EM, son los que definirán el medio, siendo ellos: la conductividad eléctrica σ , la permitividad dieléctrica ϵ y la permeabilidad magnética μ .

La permitividad absoluta de un material se calcula como el producto de la permitividad del vacío ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m) y la permitividad relativa ϵ_r , que es una constante adimensional del material (constante dieléctrica):

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (1)$$

La constante dieléctrica nos da una medida de la capacidad de polarización de un material en la presencia de un campo eléctrico. Sus valores están comprendidos entre el mínimo ($\epsilon_r = 1$) del aire y el máximo ($\epsilon_r = 81$) del agua. Esto se refleja en la profundidad de registro que puede alcanzarse (que depende además de las condiciones del medio analizado y el equipo utilizado). Si el medio es aire la profundidad será mayor ya no es un conductor eléctrico, pero si es agua será mucho menor ya que la onda que la atraviesa continúa su camino sin reflejarse y absorbiéndola en su paso. Por lo tanto, en un medio mojado o en el agua, la reflexión producida será superficial y el estudio no podrá realizarse a grandes profundidades, debido al gran gasto en energía absorbida. Aún en un medio seco, la energía de las ondas electromagnéticas es absorbida por las partículas del medio y sus anomalías (fallas, inclusiones, heterogeneidades en general) y el gasto de energía se produce de igual manera, aunque en menor proporción.

La prospección con georadar se basa, entonces, en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas que se propagan en un medio

heterogéneo. A pesar de la homogeneidad que pueda presentar un medio a simple vista, siempre tendremos heterogeneidades sobre las cuales la onda electromagnética incidirá provocando los fenómenos de reflexión, refracción y difracción, que luego pueden ser detectadas por el receptor captando la onda electromagnética tras su propagación por el medio material en estudio. Con éste método lo que se consigue es detectar cambios en las propiedades electromagnéticas de los materiales por los que se emiten las ondas, ya que estos parámetros son los que determinan las características del medio en conjunto con las propiedades de la onda emitida.

2 RESULTADOS OBTENIDOS

2.1 Análisis modal

El análisis modal basado en los datos medidos se llevó a cabo usando la técnica clásica de identificación del parámetro modal *Peak-Picking* (Ewins, 2000) en el dominio de la frecuencia. El método permite obtener resultados confiables siempre que se cumplan las hipótesis básicas de bajo amortiguamiento y modos separados.

Se analizó la Densidad Espectral de Potencia (siglas en inglés PSD: *Power Spectral Density*) y se identificaron las frecuencias naturales. La PSD se determinó utilizando el programa PSD versión 2.3.2 de Kinometrics Inc (Kinometrics Strong Motion Analyst, 2004).

Las frecuencias naturales se determinan a partir de los picos de resonancia en dicha función. En la Figura 7 se ilustra las funciones PSD de las mediciones de aceleraciones en las direcciones x, y, z correspondientes al acelerómetro E72 ubicado sobre el centro del tramo del Puente Gobernador del Campo.

En la Fig. 7.a) se puede observar que el sensor correspondiente a la dirección transversal al puente (dirección x-x Fig. 3) permite identificar la frecuencia fundamental $f_1=2,3$ Hz asociada a un modo de vibración en la dirección perpendicular al eje longitudinal del puente (dirección x). En la Fig. 7.b) se observa la frecuencia $f_2=3,75$ Hz obtenida con el sensor orientado en la dirección longitudinal al puente y que es además capturado por el sensor vertical (Fig. 7.c), lo que indica que está asociado al primer modo flexional vertical longitudinal. En la Tabla 3 se muestra el resumen de las frecuencias capturadas por los sensores ubicados tanto en centro de tramo como a la altura de pila del Puente Gobernador del Campo.

En la Tabla 4 se muestra un resumen de las frecuencias capturadas con los sensores ubicados sobre tablero del Puente Ferrocarril Mitre.

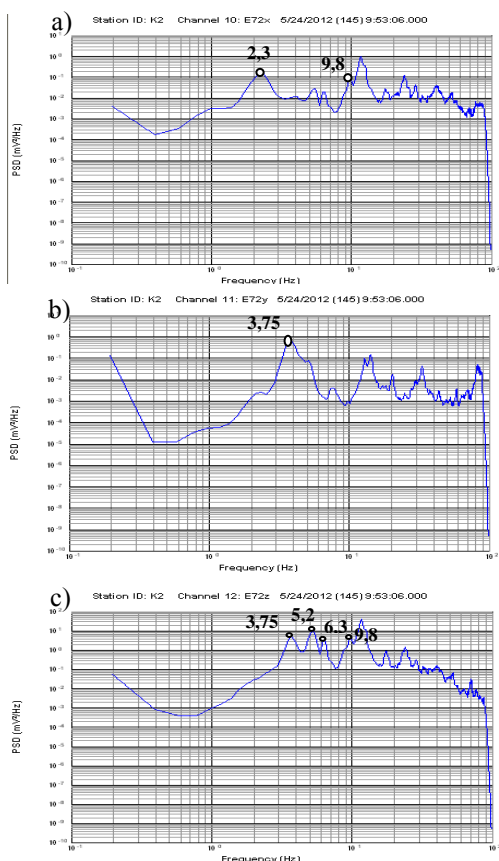


Figura 7: Función Densidad Espectral de Potencia (PSD). Puente Gob. del Campo. a) Transversal; b) longitudinal; c) vertical.

2.2 Análisis con georadar

Se procedió a realizar el estudio con el equipo de georadar de los puentes estudiados.

Como se indica en la Tabla 2, a mayor frecuencia, mayor nivel de detalle en la obtención y posterior análisis de los radargramas, con lo que sería posible apreciar detalles superficiales o cuasi-superficiales no detectados a simple vista como fisuras en la losa de hormigón. En esta ocasión se utilizó una antena de 900 MHz para poder apreciar armaduras, espesores, posibles oclusiones o patologías en la estructura.

Se realizaron exploraciones sobre el tablero de los puentes, trazando perfiles transversales de los mismos sobre ejes de columnas y entre ejes de columnas. Además, a fin de detectar las armaduras y/o posibles discontinuidades (fisuras, etc.) se realizó una exploración de algunas columnas, tanto siguiendo su perímetro, a un metro del nivel del suelo, como en su longitud vertical, hasta 1,75 de altura.

Para el puente Gobernador del Campo los perfiles transversales se hicieron en dirección O-E: a) un perfil sobre el eje de columnas y b) uno por cada tramo del mismo con el fin de detectar las vigas de hormigón pretensado.

Tabla 3: Resumen de frecuencias detectadas sobre tablero. Puente Gobernador del Campo

Modo	Frecuencia		Acelerómetro ubicado en centro de vano			Acelerómetro ubicado sobre pila		
	Experimental [Hz]	MEF [Hz]	longitudinal Canal y	transversal Canal x	vertical Canal z	longitudinal Canal y	transversal Canal x	vertical Canal z
Puente Este								
1er modo transversal	2.3	2.38		√			√	
1er modo flexional vertical (tramo)	3.75	3.67	√			√		
2do modo flexional vertical	5.2	5.68				√		
3er modo flexional vertical	6.3	6.35				√		
2do modo transversal (pila)	9.8	12.3		√	√		√	√

Tabla 4: Resumen de frecuencias detectadas sobre tablero: tramo y pila. Puente Ferrocarril Mitre

Modo	Frecuencia	Acel. en centro de tramo A			Acel. en centro de tramo B			Acel. en centro de tramo C			Acel. en centro de tramo D			
		Exper. [Hz]	Long y-y	Trans x-x	Vert z-z	Long y-y	Trans x-x	Vert z-z	Long y-y	Trans x-x	Vert z-z	Long y-y	Trans x-x	Vert z-z
1er modo	1.8		√			√			√			√		
2do modo	2.5		√			√			√			√		
3er modo	4		√			√			√			√		
4to modo	5.5	√		√	√		√	√		√	√		√	√
5to modo	6		√			√			√			√		
6to modo	6.4		√			√			√			√		
7mo modo	9	√	√	√		√	√		√	√		√	√	√
8vo modo	9.4		√	√		√			√			√		
9no modo	10.8		√	√	√	√	√		√	√		√	√	√
10mo modo	11				√				√			√		

Modo	Frecuencia	Acel. en centro de tramo E			Acel. en centro de tramo F			Acel. en centro de tramo G			Acelerómetro en pila E-F			Acelerómetro en pila F-G			
		Exper. [Hz]	Long y-y	Trans x-x	Vert z-z	Long y-y	Trans x-x	Vert z-z	Long y-y	Trans x-x	Vert z-z	Long y-y	Trans x-x	Vert z-z	Long y-y	Trans x-x	Vert z-z
1er modo	1.8		√			√			√			√	√	√	√	√	√
2do modo	2.5		√			√			√			√	√	√	√	√	√
3er modo	4		√			√			√			√	√	√	√	√	√
4to modo	5.5	√		√	√		√	√		√	√		√	√	√	√	√
5to modo	6		√			√			√			√	√	√	√	√	√
6to modo	6.4		√			√			√			√	√	√	√	√	√
7mo modo	9	√	√	√		√	√		√	√		√	√	√	√	√	√
8vo modo	9.4	√	√	√		√			√			√	√	√	√	√	√
9no modo	10.8	√	√	√	√	√	√		√	√		√	√	√	√	√	√
10mo modo	11				√			√				√	√	√	√	√	√

Para el puente Ferrocarril Mitre los perfiles transversales se hicieron en dirección E-O, realizando perfiles en los tramos B y F y sobre el propio eje de pila entre tramos D-E (Fig. 3). En cuanto a las columnas se analizaron las cuatro columnas (dos por cada puente) que forman el eje de pila ubicado entre tramos B-C, siendo éstas las que presentaban mayores patologías.

2.3 Análisis de radargramas

Se muestran y analizan algunos resultados de los radargramas obtenidos mediante la exploración.

Si se tiene en cuenta que hay muchos elementos estructurales y a ello se le suman las armaduras de las vigas y de la losa del tablero, deducimos que habrá muchos planos reflectores y las ondas se atenuarán rápidamente. Para poder detectar todas las anomalías del medio se selecciona una alta cantidad de muestras/traza en el equipo.

El software RADAN 6.6 (software utilizado para el tratamiento de las imágenes crudas obtenidas) contiene una serie de filtros (*Infinite Impulse Response filter* (IIR), *Finite Impulse Response filter* (FIR), *Gain*, *Background removal*, etc.) para tratar las imágenes, y de esta manera obtener resultados más “limpios” y claros para analizar los mismos de una manera más eficiente.

Se aclara en primera instancia que para obtener resultados más detallados y una mayor definición en la respuesta, sería necesaria la utilización de una antena de mayor frecuencia, como las de 1600 MHz o 2000 MHz, específicas para analizar detalles en estructuras de hormigón, como la presencia de fisuras y detección de armaduras y su separación con mayor nivel de detalle.

En la Figura 8 se muestra dos perfiles transversales del puente Gobernador del Campo, el primero de ellos corresponde al perfil sobre eje de columnas mientras que el segundo corresponde a uno de los tramos.

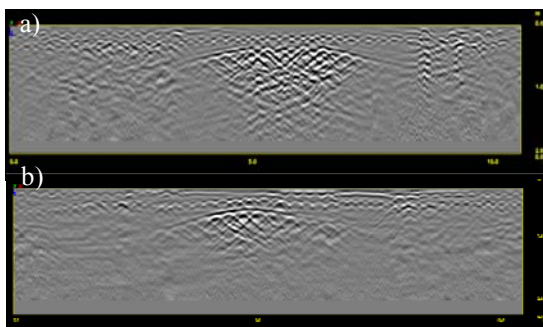


Figura 8: Perfiles transversales sobre puente Gobernador del Campo. a) Sobre eje de columnas; b) sobre tramo

En ambos se detecta de manera clara la armadura de la losa en la parte superior y su espesor de 0,4

metros. La diferencia entre uno y otro está en la zona media del perfil, donde en el segundo radargrama se aprecia más en detalle el borde de la losa, mientras que en el primero se aprecia la presencia de la viga transversal de 1 metro de altura que se encuentra entre las columnas.

En la Figura 9 se muestra el radargrama obtenido para una de las columnas del puente Gobernador del Campo. Se realizó una medición en la dirección del eje longitudinal de la misma hasta una altura de 1,75, como se aprecia en la escala horizontal. Se puede observar la distribución y equidistancia de las armaduras transversales, que quedan representadas por las ondas en la parte superior. Además, se confirma el diámetro de la columna, mediante la profundidad en la escala vertical (aproximadamente 1 metro). No se visualizan (en este perfil) ninguna oclusión o patología evidente en el interior de la misma.

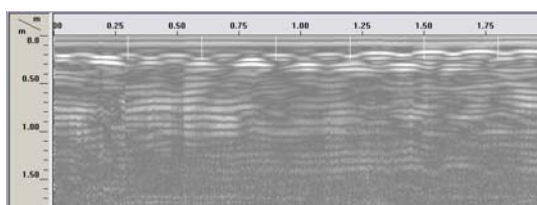


Figura 9: Perfil vertical de una columna del puente Gobernador del Campo

En la Figura 10 se muestra un zoom del perfil vertical (longitudinal) de las columnas, se puede apreciar la armadura transversal (dibujadas sobre el radargrama), comprobando que la misma se encuentra a una equidistancia de aproximadamente 15 cm, medida que verifica coincidencia con los detalles de los planos y documentación técnica disponible del puente mencionado.

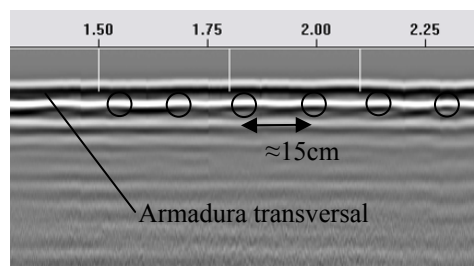


Figura 10: Detalle del perfil vertical de una columna del puente Gobernador del Campo

3 MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL

Se realizó una modelación tridimensional del Puente Gobernador del Campo utilizando el programa de elementos finitos SAP 2000 (CSI Analysis Reference Manual, 2010). Para la modelación del tablero se utilizaron elementos tipo lámina (*shell*), en tanto que para las vigas

(longitudinales y transversales) y columnas, elementos tipo barra (*frame*).

Se consideraron los siguientes aspectos:

a) La losa tablero se modeló en forma continua para ambos tramos. Las dos columnas se vinculan a las dos vigas principales longitudinales;

b) Los nodos a nivel de fundación de las dos columnas intermedias se consideraron empotrados;

c) Para los apoyos de neopreno (tablero-estribo) se emplearon resortes elásticos con rigidez:

$T_l = T_t = 55.000K \text{ N/m}$ y $T_v = \infty$; donde l , t y v son las direcciones longitudinal, transversal y vertical, respectivamente;

d) Características mecánicas de los materiales: La superestructura del puente (Mendez et al, 2012) fue diseñada con hormigones de resistencia a compresión simple de RC 28 = 300 kg/cm² (la nomenclatura corresponde a la normativa vigente durante el período de diseño de los puentes). Se adoptó un módulo de Elasticidad de 29.000 MPa.

En la Figura 11 se muestra el modelo tridimensional, en total se emplearon 136 elementos barra y 520 elementos lámina.

Con el fin de calibrar el modelo y verificar las características mecánicas adoptadas se compararon las frecuencias obtenidas. En la Tabla 5 se muestra la comparación de las primeras frecuencias entre los valores obtenidos experimentalmente y los obtenidos con el modelo de elementos finitos 3D. La discrepancia (D) entre los valores experimentales (f_{exp}) y numéricos (f_{num}) se calculó como

$$D = \left| \frac{f_{exp} - f_{num}}{f_{exp}} \right| \times 100 \quad (2)$$

Tabla 5: Comparación de frecuencias Puente Gobernador del Campo

Modo	Frecuencia Exp. [Hz]	Frecuencia SAP 2000 [Hz]	Discrepancia D [%]
1	2,3	2,38	3,48
2	3,75	3,67	2,13
3	5,2	5,68	9,23
4	6,3	6,35	0,79
5	9,8	12,3	25,51

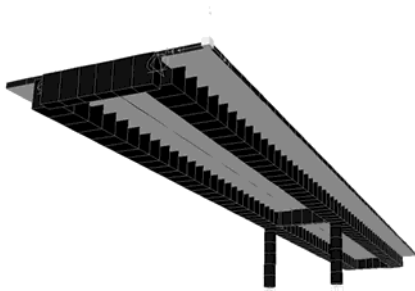
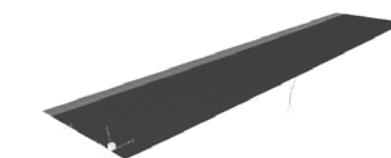


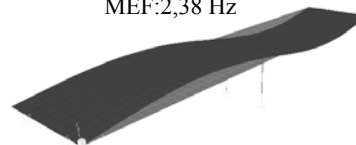
Figura 11: Modelo tridimensional del Puente Gobernador del Campo

En las dos primeras frecuencias se observa que los valores aproximan razonablemente, lo que confirma la estimación del módulo de Young previamente adoptado. Las mayores diferencias se observan en modos superiores y pueden deberse al deterioro de los apoyos de neopreno. En un estudio posterior se propondrá un modelo adecuado a fin de estimar dicho comportamiento.

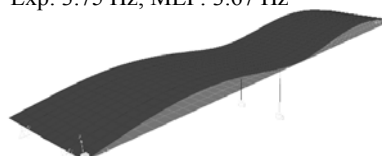
En la Figura 12 se muestran las frecuencias y formas modales obtenidas con el modelo tridimensional. Se puede observar que el primer modo está asociado a una forma modal con desplazamiento dominante en la dirección transversal, lo cual también es evidenciado por los sensores que capturan la frecuencia correspondiente (Tabla 5). Las frecuencias correspondientes a las Fig. 12 b), c) y e) corresponden a modos predominantemente flexionales en la dirección vertical, en tanto que la forma modal correspondiente a la Fig. 12 d) es compatible con un modo flexotorsional.



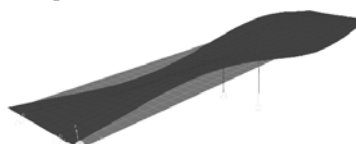
a) 1er Modo transversal. Exp: 2,3 Hz; MEF: 2,38 Hz



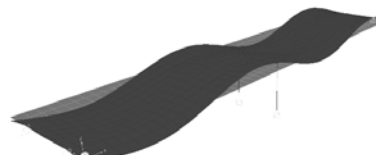
b) 1er Modo flexional vertical Exp: 3.75 Hz; MEF: 3.67 Hz



c) 2do Modo flexional vertical Exp: 5,2 Hz; MEF: 5,68 Hz



d) 3er Modo flexional vertical Exp: 6,3 Hz; MEF: 6,35 Hz



e) 1er Modo flexional vertical Exp: 9,8 Hz; MEF: 12,3 Hz

Figura 12: Frecuencias y formas modales. Puente Gobernador del Campo

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan los resultados correspondientes a la primera etapa de evaluación de la vulnerabilidad estructural de dos puentes de hormigón. En primer lugar se presenta la determinación de las características dinámicas de manera experimental y numérica. De dicho estudio se pueden extraer las siguientes consideraciones finales:

-En virtud de las características de los puentes estudiados, los ensayos de vibración ambiental resultan adecuados, rápidos e implican un mínimo de interferencia con el uso normal del mismo.

-La medición de la respuesta estructural a través de vibración ambiental ha demostrado ser un medio eficaz para la identificación de las propiedades dinámicas de los puentes. Las mediciones son suficientes para identificar las frecuencias más significativas en el rango 0-15 Hz.

Se obtuvo un ajuste razonable entre los resultados experimentales y los numéricos; las mayores diferencias se observan en modos superiores y pueden deberse a la degradación de los apoyos de neopreno.

Del estudio con georadar se puede expresar las siguientes consideraciones finales:

El análisis de los radargramas obtenidos permitió verificar los espesores de losas de tableros, la ubicación y altura de las vigas transversales y longitudinales, la posición de las armaduras y su separación.

El estudio detallado de los radargramas de los perfiles longitudinales de columnas, permitió confirmar la separación y cantidad de armadura transversal.

En las zonas donde se realizaron los perfiles y se obtuvieron los radargramas, no se visualizan hoquedades o discontinuidades de tamaños apreciables.

REFERENCIAS

- Brownjohn J.M.W., A.A. Dumanoglu & R.T. Severn, Ambient vibration survey of the Faith Sultan Mehmet (Second Bosphorus) suspension bridge, *Earthquake Eng. Struct. Dynam*, 21, 907-24, 1992.
- Dérobot X., J. Iaquina, G. Klysz & J.P. Balayssac, Use of capacitive and GPR techniques for the non-destructive evaluation of cover concrete, *NDT&E International*, 41, 44-52, 2008.
- Ewins D.J., Modal testing Theory, practice and application. *Research Studies Press LTD*. England, 2000.

- Gentile C., F. Martinez & Cabrera, Dynamic performance of twin curved cable-stayed bridges, *Earthquake Eng. Struct Dynam*; 33: 15-34, 2004.
- Imposa S., F. Barone S. Gresta & A. Leone, Ground penetrating radar survey finalized to the recovery of the "S. Agata alla Badia" Church in Catania (eastern Sicily, Italy), *Environ Geol* 58:889-896, 2009.
- Kinematics Inc., *Altus Digital Recorder User's Manual*, Kinematics Inc. USA, 2002.
- Kinematics Strong Motion Analyst. Document 302415. Revision G, 2004
- Kohan, P.H., L.G. Nallim, S. Gea & M.W. Toledo, Determinación analítica-numérica y experimental de las características dinámicas de la torre de un campanario. *8vo Simposio Internacional de Estructuras, Geotecnia y Materiales de Construcción*. ISBN: 978-959-250-449-3, Cuba. 2008.
- Lahouar S. & I.L. Al-Qadi, Automatic detection of multiple pavement layers from GPR data. *NDT&E International*, 41,69-81, 2008.
- Maierhofer C., S. Leipold, Radar investigation of masonry structures. *NDT&E International* 34: 139-147, 2001
- Mendez J., E. Galíndez; G. Pérez, Índice de Vulnerabilidad sísmica de puentes de hormigón. *XXXV Jornadas Sudamericanas. Río de Janeiro*, Septiembre, 2012.
- RADAN 6.6. Software (Radar Data Analyzer). User's Manual. Geophysical Survey Systems, Inc., 2008.
- SAP 2000 Versión 14. Linear and Nonlinear static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures. *Computers and Structures*, Inc. Berkeley, USA. 2010
- Soutsos M.N., J.H. Bungey, S.G. Millard, M.R. Shaw, A. Patterson, Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing. *NDT&E International* 34: 419-425, 2001
- Toledo M.W.E., F. Bellomo, L. Nallim, S. Gea, R. Caro, Análisis de características dinámicas de estructuras. *VII Encuentro de investigadores y Profesionales Argentinos de la Construcción - EIPAC 2007*. ISBN 978-987-9381-84-7 1ª ED. Salta. 2007
- Toledo M.W.E., I. Vargas, S. Gea, L. Nallim, Características dinámicas del campanario de la Basílica de San Francisco (Salta). *9º Encuentro de Investigadores y Profesionales Argentinos de la Construcción EIPAC 2011*. Salta. 2011.