

## **ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE UN PUENTE EN LA CIUDAD DE SALTA**

### **TOLEDO, MARIO WALTER EFRAÍN**

Mag. Ingeniero Civil

Facultad de Ingeniería, Consejo de Investigación, Universidad Nacional de Salta.

e-mail: mwtoledo@unsa.edu.ar

### **SÁNCHEZ, EZEQUIEL DOMINGO**

Facultad de Ingeniería, Consejo de Investigación, Becario EVC-CIN, Universidad Nacional de Salta.

e-mail: ezequiels89@hotmail.com

### **QUINTEROS, RICARDO DANIEL**

Dr. Ingeniero Civil

INIQUI-CONICET, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta;

e-mail: rdquinteros@conicet.gov.ar

### **PÉREZ, GUSTAVO**

Ingeniero Civil

Instituto de Estructuras "Ing. Arturo M. Guzmán", Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán.

e-mail: gperez@herrera.unt.edu.ar

## **RESUMEN**

Este trabajo presenta los resultados provenientes de la continuación en el estudio de puentes, que se realiza en el marco del Proyecto PICTO-SISMO N° 251 que se ejecuta 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. El objetivo principal del proyecto es la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes ubicados en zonas de alta peligrosidad sísmica. En este caso se estudia el puente UNSa-Norte, de hormigón armado, emplazado en la intersección de la Ruta Nacional N° 9 y Av. Fuerza Aérea de la ciudad de Salta.

A fin de relacionar la variación de las características dinámicas con el posible daño en el puente, se propuso un programa de ensayos en diferentes etapas o períodos durante la vida útil del mismo. En este caso se comparan las mediciones realizadas durante los seis primeros años de servicio. Los resultados preliminares muestran una variación del orden del 5% en las dos primeras frecuencias naturales de vibración. A fin de corroborar algunos de los resultados obtenidos se presentan comparaciones con un modelo tridimensional de elementos finitos previamente construido y calibrado.

El estudio se completa utilizando un georadar para verificar las armaduras y posibles discontinuidades u otras patologías en los elementos de hormigón armado.

## ABSTRACT

*This paper presents the results from the continuation in the study of bridges, performed in the framework of the project PICTO-SISMO N° 251 study run jointly between Structures Institute of UNT and Institute of Civil Engineering and the Environment of UNSa. The project's main objective is the evaluation of the seismic vulnerability of bridges located in areas of high seismic hazard. In this case the studied bridge is UNSa-Norte, of reinforced concrete, located at the intersection of Ruta Nacional N°9 and Av. Fuerza Aérea of Salta city.*

*In order to relate the variation of dynamic characteristics with possible damage on the bridge, a testing program is proposed in different stages or periods during the life of the same. In this case the measurements made are compared during the first six years of service. Preliminary results show a variation of about 5% in the first two natural frequencies of vibration. To corroborate some results obtained, comparisons are presented with a finite elements three-dimensional model previously constructed and calibrated.*

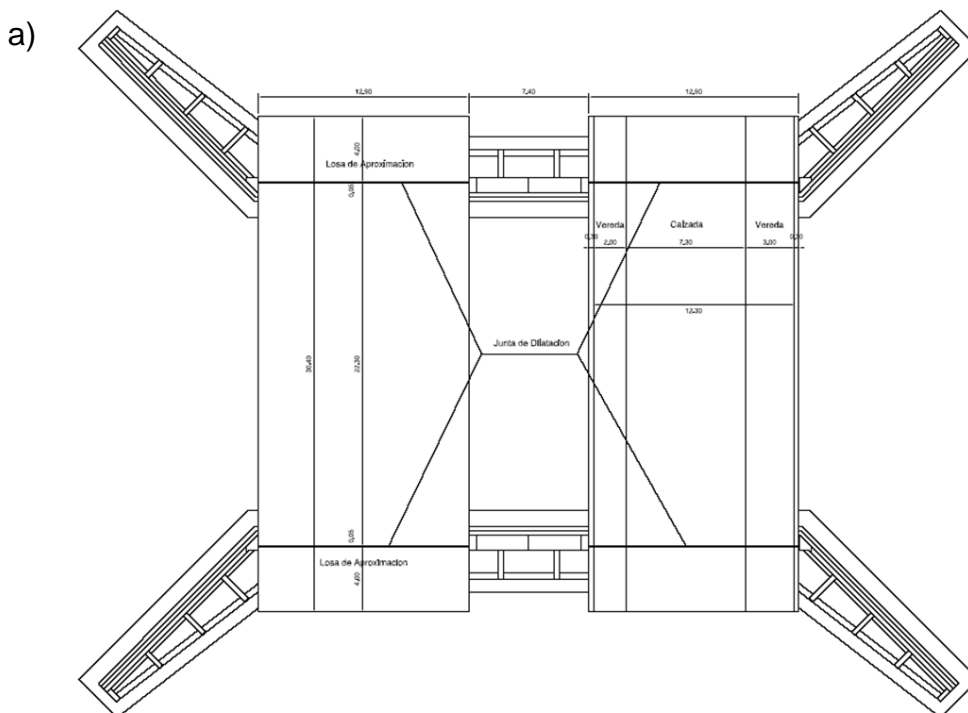
*The study is completed using a georadar to verify armor and possible discontinuities or other conditions in reinforced concrete elements.*

## 1. Descripción del Puente estudiado

El puente UNSa Norte tiene 22.40 m de luz y está emplazado en la intersección de la Ruta Nacional N° 9 y Av. Fuerza Aérea de la ciudad de Salta (Figura 1). La superestructura está constituida por un tablero de hormigón armado de 0,15 m de espesor, seis vigas principales pretensadas doble T de 1.35 m de altura, tres vigas transversales de arriostramiento de 0,95 m de altura y dos vigas laterales longitudinales de 0.50 m de altura sobre las que apoyan los elementos no estructurales (Figura 2). Cada viga principal descansa sobre apoyos de neopreno de 30cmx 30cmx4cm.



Figura 1. Ubicación geográfica del Puente UNSa Norte en la Ciudad de Salta



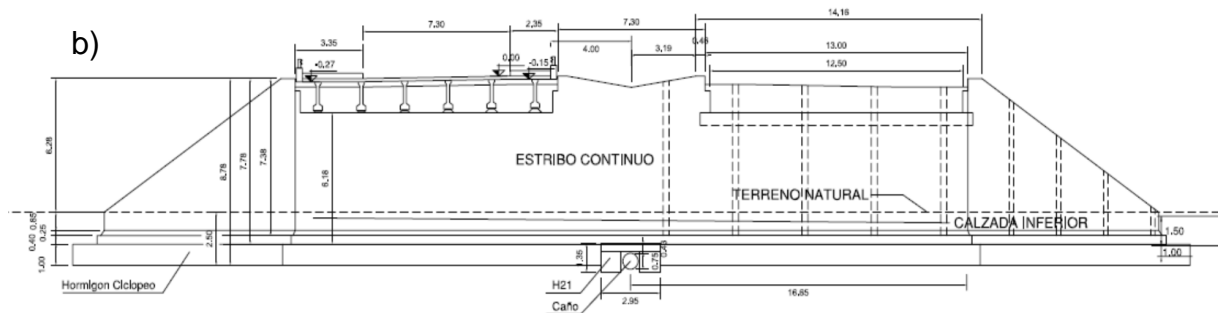


Figura 2. Estructura del Puente: a) Vista Superior Cazada – Losa de Aproximación; b) Corte transversal: Estribo Margen Norte visto desde el centro de Puente

En un trabajo previo ([1] Toledo Mario W. E., et. al, 2007) se determinaron las características dinámicas del puente, que en esa época (año 2007) estaba recién construido. En el marco del Proyecto PICTO-SISMO N° 251 se propone realizar un nuevo estudio experimental. A tal fin, se realizaron tareas de campo a fin de determinar las características dinámicas actuales (año 2013) y a fin de verificar armaduras y posibles discontinuidades u otras patologías en los elementos de hormigón armado, se realizó un estudio con georadar.

## 2. Determinación de 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.

Para estructuras tipo puentes la tendencia es realizar estudios de vibración ambiental frente a los de vibración forzada ([2] Toledo Mario W. E., et. al, 2013)

El equipo utilizado para los ensayos incluyó una registradora digital de doce canales, modelo K2 marca Kinemetrics ([3] Kinemetrics Inc., 2002) y cuatro acelerómetros triaxiales de balance de fuerzas (Figura 3).

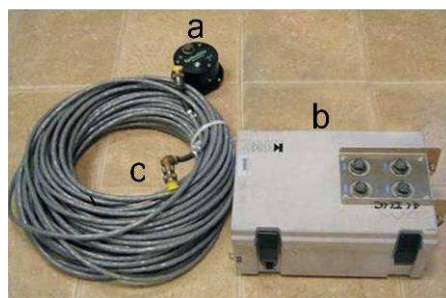


Figura 3: Equipo de medición utilizado: a) Acelerómetro triaxial de balance de fuerza; b) Registradora digital 12 canales K2; c) Cables conductores

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.

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 como se indica en la Figura 4. La estación adquirente 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 se colocaron sobre el tablero en los cuartos y en el centro de la luz respectivamente.

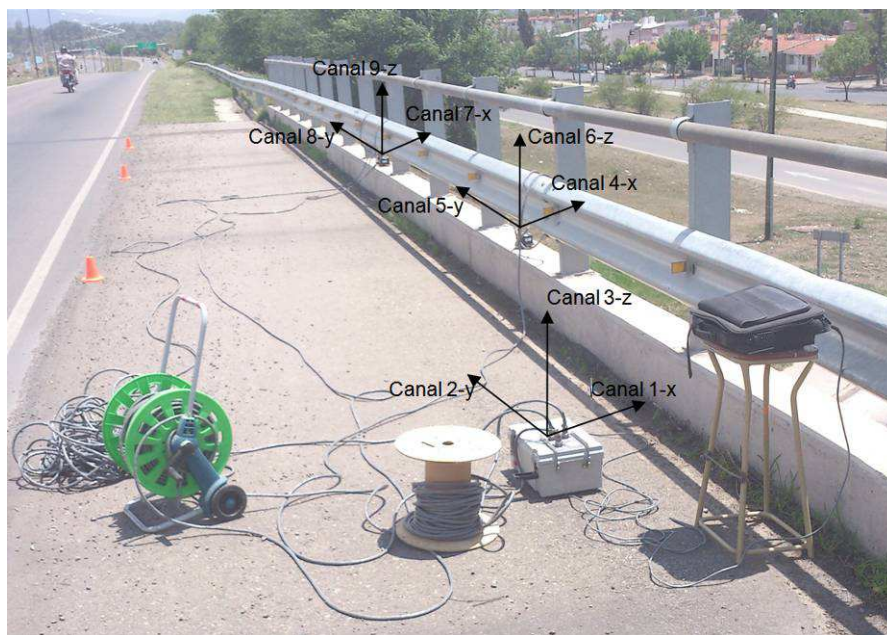


Figura 4: Ubicación de los sensores en el puente para llevar a cabo las mediciones

### 3. Análisis de resultados

El análisis modal basado en los datos medidos se llevó a cabo usando la técnica clásica de identificación del parámetro modal Peak-Picking ([4] Ewins D.J., 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 Kinematics Inc ([5] Kinematics Strong Motion Analyst, 2004). Las frecuencias naturales se determinan a partir de los picos de resonancia en dicha función.

En las Figuras 5, 6 y 7 se presenta la comparación de las mediciones realizadas en el mismo puente en el año 2007 y el año 2013. En ellas se muestra la densidad espectral de potencia correspondiente a las componentes transversal, longitudinal y vertical del tablero (direcciones x, y, z respectivamente).

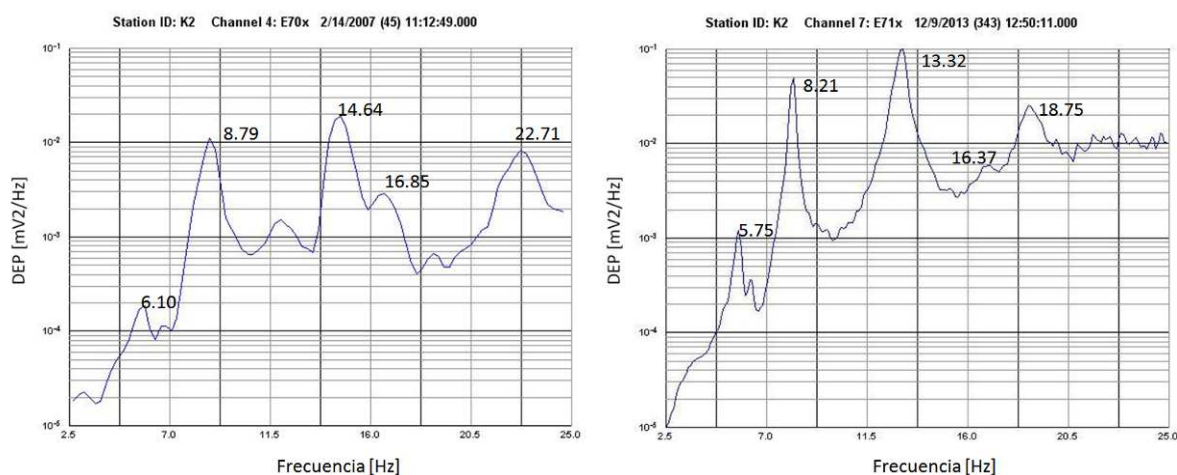


Figura 5: Resultados en la componente transversal (eje x)

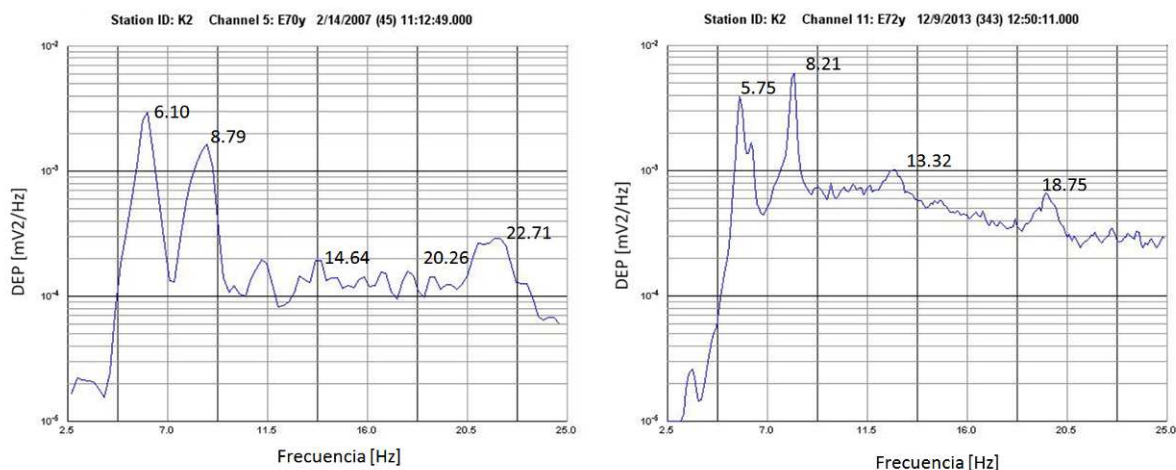


Figura 6: Resultados en la componente longitudinal (eje y)

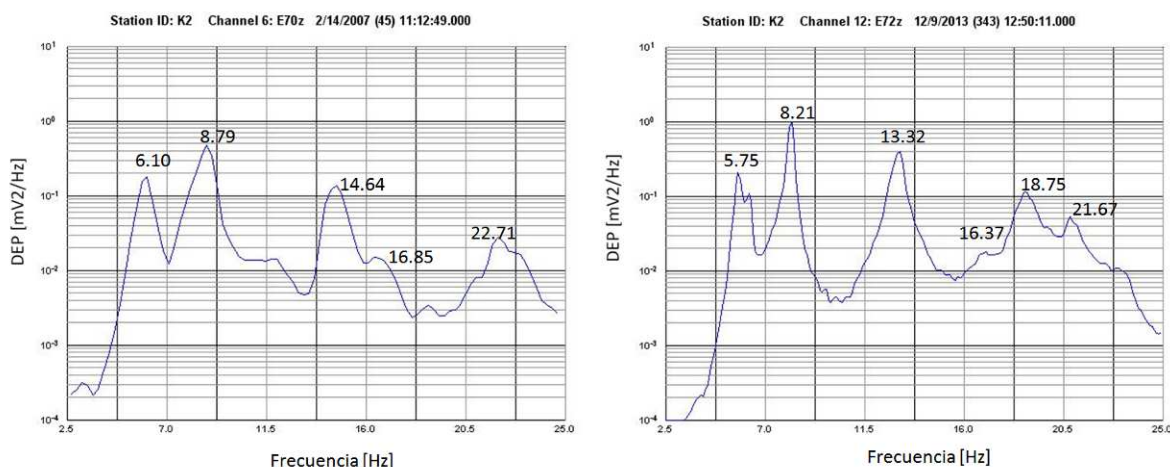


Figura 7: Resultados en la componente vertical (eje z)

En Tabla 1 se presenta el resumen de los resultados obtenidos. Se observa que para la frecuencia fundamental (1er modo flexional vertical) existe una variación entre los resultados experimentales del año 2007 y la medición actual del orden del 5,74%.

Modo	Eje	Año 2007			Año 2013			Variación		
		Exp. [Hz] (1)	Transversal	Longitudinal	Vertical	Exp. [Hz] (3)	Transversal	Longitudinal	Vertical	Exp. [%] (1) - (3)
<b>1er modo flexional vertical</b>	<b>Z</b>	<b>6,10</b>	√	√	√	<b>5,75</b>	√	√	√	5,74%
1er modo torsional	ZY	8,79	√	√	√	8,21	√	√	√	6,60%
1er modo torsional lateral	X	14,64	√	√	√	13,32	√	√	√	9,02%
<b>2do modo flexional vertical</b>	<b>Z</b>	<b>16,85</b>	√		√	<b>16,37</b>	√		√	<b>2,85%</b>
2do modo torsional	Y	20,26		√		18,75	√	√	√	7,45%
2do modo torsional lateral	ZX	22,71	√	√	√	21,67			√	4,58%

Tabla 1 – Resumen y comparación de los resultados experimentales obtenidos

#### 4. Modelación numérica

Se construyó un modelo tridimensional con elementos finitos utilizando el programa SAP 2000 ([6] Computers and Structures, 2010) en base a los planos de detalle de la estructura del puente. Para la modelación del tablero, vigas principales y vigas de arriostamiento fueron utilizados elementos tipo lámina (“Shell” según denominación del programa), para las vigas laterales elementos tipo barra (“frame” según programa) y para los apoyos de neopreno se empleó elementos “link”

considerándolos como vínculos elásticos con rigidez traslacional rotacional obtenidas del modelo numérico de la referencia [1]. Además, la junta de dilatación transversal existente entre la losa de calzada y de aproximación también fue modelada con elementos tipo lámina shell. En las Figuras 8 y 9 se muestran el puente UNSa Norte y el modelo tridimensional de elementos finitos del puente, mientras que en la Figura 10 se presenta las primeras formas modales obtenidas.



Figura 8: Estructura real del Puente UNSa Norte vista desde el plano inferior

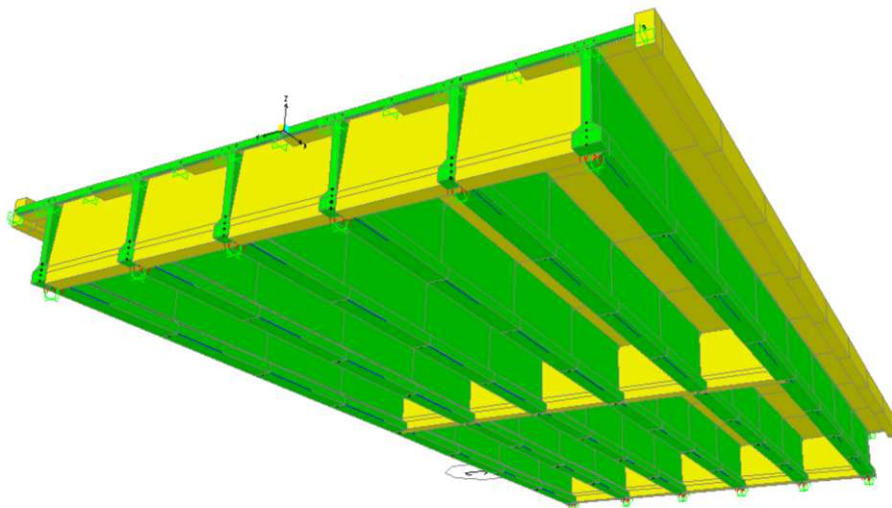


Figura 9: Modelo tridimensional con software de elementos finitos SAP 2000

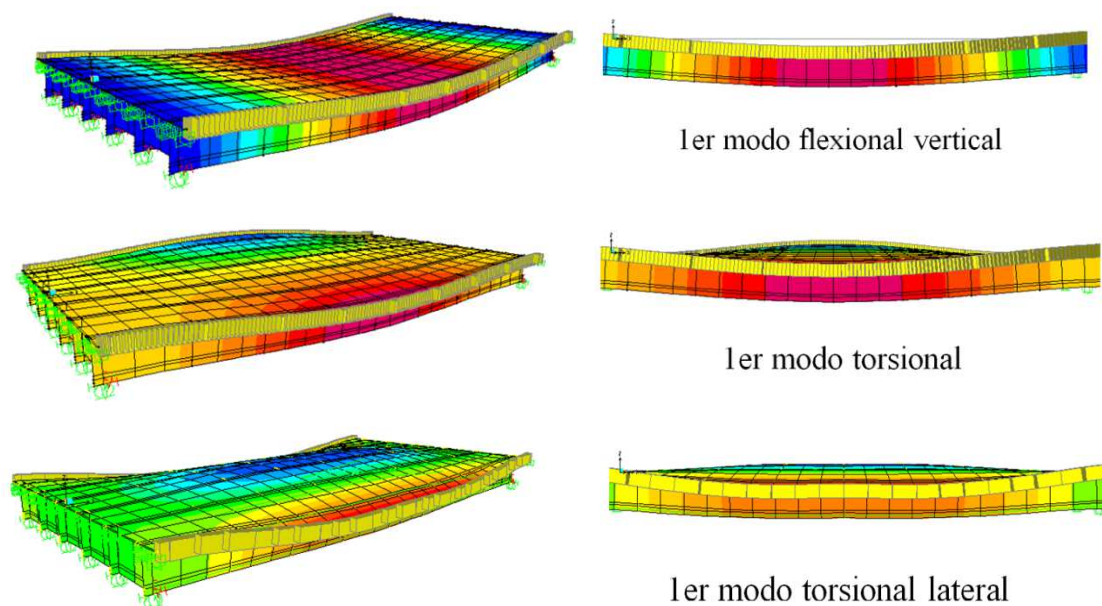


Figura 10: Primeras formas modales del Puesto según el modelo numérico

### 5. Comparación de Resultados

La comparación de los resultados obtenidos, en el año 2013, con el modelo numérico y los experimentales se muestra en Tabla 2. En general se observa una buena concordancia entre los resultados obtenidos, las mayores diferencias se observan en los modos superiores.

Modo	Eje	Año 2013					
		Exp. [Hz] (3)	Num. [Hz] (4)	[%] (3) - (4)	Transversal	Longitudinal	Vertical
<b>1er modo flexional vertical</b>	<b>Z</b>	<b>5,75</b>	<b>5,60</b>	<b>2,59%</b>	√	√	√
1er modo torsional	ZY	8,21	7,71	6,07%	√	√	√
1er modo torsional lateral	X	13,32	13,23	0,69%	√	√	√
<b>2do modo flexional vertical</b>	<b>Z</b>	<b>16,37</b>	<b>15,59</b>	<b>4,78%</b>	√		√
2do modo torsional	Y	18,75	18,25	2,67%	√	√	√
2do modo torsional lateral	ZX	21,67	20,61	4,90%			√

Tabla 2 – Comparación entre resultados experimentales y numéricos obtenidos

Si comparamos los resultados obtenidos entre el 2007 y el 2013 (Tabla 1) se observa una disminución de las frecuencias naturales de la estructura con magnitudes variables. La primera frecuencia sufrió una disminución de aproximadamente un 6%. En la Figura 11 se muestra la variación en las mediciones

experimentales de las diferentes frecuencias obtenidas.

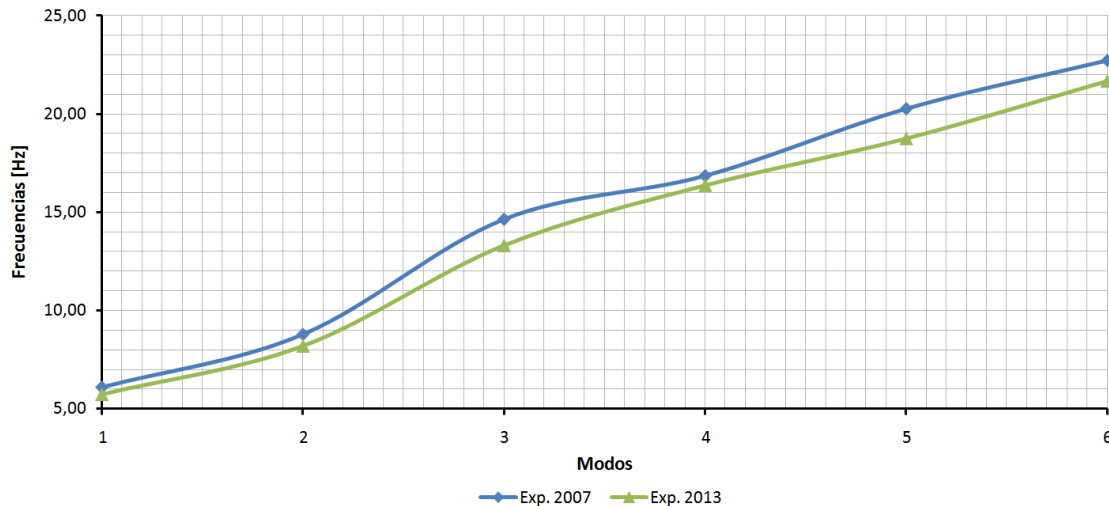


Figura 11: Comparación grafica entre las frecuencias medidas experimentalmente

A priori, no se puede concluir que esta disminución se debe directamente a una pérdida de rigidez ocasionada por posibles daños, ya que se necesitarían un programa experimental más completo que tenga en cuenta un análisis de la influencia de los errores en las mediciones (tanto por las condiciones medioambientales en el equipo) como las provenientes de considerar la influencia del tránsito vehicular de la Ruta (mediciones en horas pico y valle). Además, hay considerar la posible degradación de los apoyos de neopreno que condicionan directamente las frecuencias obtenidas. Sin embargo se observaron en algunos elementos de hormigón micro fisuras que pueden suponer una pérdida de rigidez.

Por ello se propuso realizar un estudio con el modelo numérico variando los módulos del hormigón. En Tabla 3 se muestra el estudio de variación porcentual del módulo de elasticidad del hormigón (H-21 para el caso de tableros y vigas transversales; y H-38 para las vigas longitudinales), se puede apreciar que para una variación del orden del 11% del módulo de elasticidad se obtiene una variación del orden del 5,5% de la frecuencia fundamental.

Futuras mediciones permitirán realizar conclusiones sobre los otros aspectos que no se tuvieron en cuenta en este análisis.

Variación considerada aplicada al módulo	Calidad del Hormigón		Variación de la Frecuencia Fundamental
	H-21	H-38	
	Variación del Módulo [MPa]		
	30.000	37.000	
1%	29.997	36.996,3	0,49%
2%	29.994	36.992,6	0,99%
3%	29.991	36.988,9	1,49%
4%	29.988	36.985,2	1,99%
5%	29.985	36.981,5	2,49%
6%	29.982	36.977,8	2,99%
7%	29.979	36.974,1	3,50%
8%	29.976	36.970,4	4,01%
9%	29.973	36.966,7	4,53%
10%	29.970	36.963,0	5,04%
<b>11%</b>	<b>29.967</b>	<b>36.959,3</b>	<b>5,56%</b>
12%	29.964	36.955,6	6,09%
13%	29.961	36.951,9	6,61%
14%	29.958	36.948,2	7,14%
15%	29.955	36.944,5	7,67%

Tabla 3: Estudio variación porcentual del Módulo de Elasticidad

Finalmente en la Tabla 4 se presenta un resumen de los resultados experimentales obtenidos y los valores numéricos calculados de las primeras frecuencias naturales analizadas. En la misma tabla también se hace referencia a las formas modales identificada en cada caso, mediante un tilde ([7] Mac Donald and Daniell, 2005) y se indica el canal del acelerómetro que capturó cada frecuencia.

También se establece la comparación y variación porcentual entre los valores obtenidos en el año 2007 y los ensayos actuales.

Modo	Año 2007						Año 2013						Variación	
	Exp. [Hz] (1)	Num. [Hz] (2)	[%] (1) - (2)	Transversal	Longitudinal	Vertical	Exp. [Hz] (3)	Num. [Hz] (4)	[%] (3) - (4)	Transversal	Longitudinal	Vertical	Exp. [%] (1) - (3)	Num. [%] (2) - (4)
<b>1er modo flexional vertical</b>	<b>6,10</b>	<b>5,93</b>	<b>2,77%</b>	√	√	√	<b>5,75</b>	<b>5,60</b>	<b>2,59%</b>	√	√	√	5,74%	<b>5,56%</b>
1er modo torsional	8,79	8,17	7,08%	√	√	√	8,21	7,71	6,07%	√	√	√	6,60%	5,58%
1er modo torsional lateral	14,64	14,02	4,26%	√	√	√	13,32	13,23	0,69%	√	√	√	9,02%	5,63%
<b>2do modo flexional vertical</b>	<b>16,85</b>	<b>16,51</b>	<b>2,02%</b>	√	√	√	<b>16,37</b>	<b>15,59</b>	<b>4,78%</b>	√	√	√	<b>2,85%</b>	<b>5,58%</b>
2do modo torsional	20,26	19,34	4,56%	√	√	√	18,75	18,25	2,67%	√	√	√	7,45%	5,62%
2do modo torsional lateral	22,71	21,84	3,82%	√	√	√	21,67	20,61	4,90%	√	√	√	4,58%	5,65%

Tabla 4: Resumen y comparación final de todos los resultados experimentales obtenidos y los resultados numéricos calculados

## 6. Análisis con Geo-Radar

Existen un gran número de técnicas no destructivas que pueden usarse para análisis estructurales no invasivos tales como R-X, ultrasonido, monitoreo acústico, etc. Entre ellas se encuentra el Radar de Penetración de Suelos (GPR: *Ground Penetrating Radar*), diseñado para penetrar objetos sólidos o visualmente opacos el cual 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. El análisis en una obra del campo de la ingeniería civil con la técnica del georadar resulta interesante ya que es posible, entre otras cosas, identificar las distintas partes que conforman la obra en su totalidad, como por ejemplo capas de pavimento y/o de compactación de carretera [8]; losas de calzada y vigas pretensadas de puentes [2]; armaduras en hormigón armado [9]; instalaciones subterráneas (agua, cloacas, gas, electricidad y comunicaciones, etc.) y permite detectar e identificar patologías de edificios (humedades, grietas, etc.) [10].

El equipo de georadar utilizado (Fig. 12) 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.

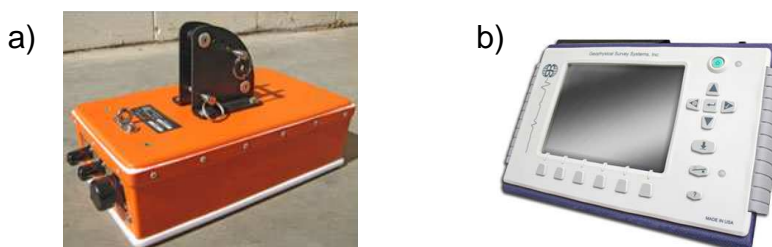


Figura 12: Equipo georadar: a) Antena de 900 MHz; b) Transductor

Dependiendo de las características del medio, y de la antena utilizada, es posible el análisis con georadar a profundidades de entre 0,1-0.3 a 15-20 m. En la Tabla 5 se muestran las profundidades promedio que pueden alcanzar las distintas antenas, de acuerdo a su frecuencia media y por lo tanto su consiguiente aplicación:

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

Tabla 5. Características y aplicación de las antenas

Se realizó un estudio con el equipo disponible de georadar del puente estudiado, con el propósito de apreciar las armaduras, dimensiones generales y la detección de posibles discontinuidades o patologías (grandes fisuraciones, discontinuidad de armadura, oclusiones, etc.). Como se indicó en la Tabla 5, mientras mayor es la frecuencia, mayor es el nivel de detalle en la obtención y posterior análisis de los radargramas. En esta ocasión se utilizó una antena disponible de 900 MHz. Con antenas de 1600 o 2600 MHz sería posible apreciar detalles superficiales o cuasi-superficiales no detectados a simple vista como por ejemplo fisuras en la losa de hormigón.

Se realizaron en total cuatro prospecciones sobre las calzadas del tablero del puente, trazando perfiles transversales del mismo en las ubicaciones detalladas en la Figura 13. Los perfiles transversales se hicieron en las direcciones O-E y E-O (dos por perfil) con el propósito de obtener: a) un perfil sobre la viga pretensada transversal correspondiente a la mitad de la luz (B y C) y b) uno en un tramo de cada calzada del mismo para detectar las vigas pretensadas de hormigón (A y D).

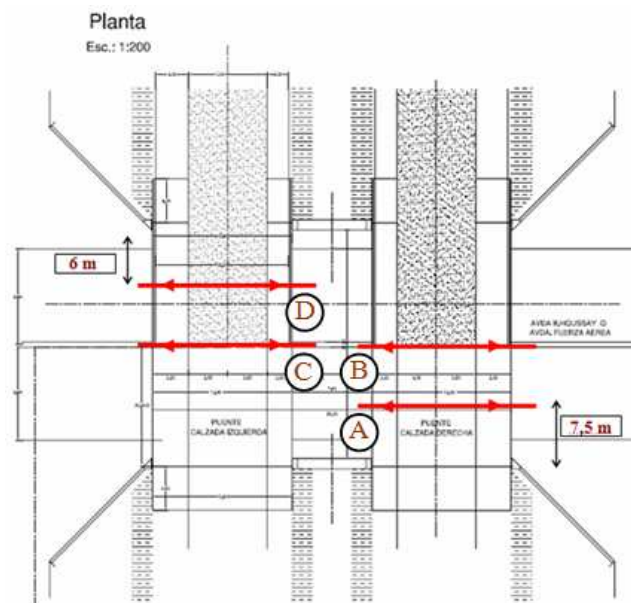


Figura 13: Ubicación de los perfiles de prospección

En el radargrama de la Figura 14, correspondiente al perfil de prospección A se aprecia la losa de calzada que se encuentra acorde a los planos, de un espesor aproximado de 15 cm y una separación uniforme de la armadura correspondiente. El radargrama permite además ubicar aproximadamente la posición de las vigas pretensadas longitudinales (Figura 2.b).

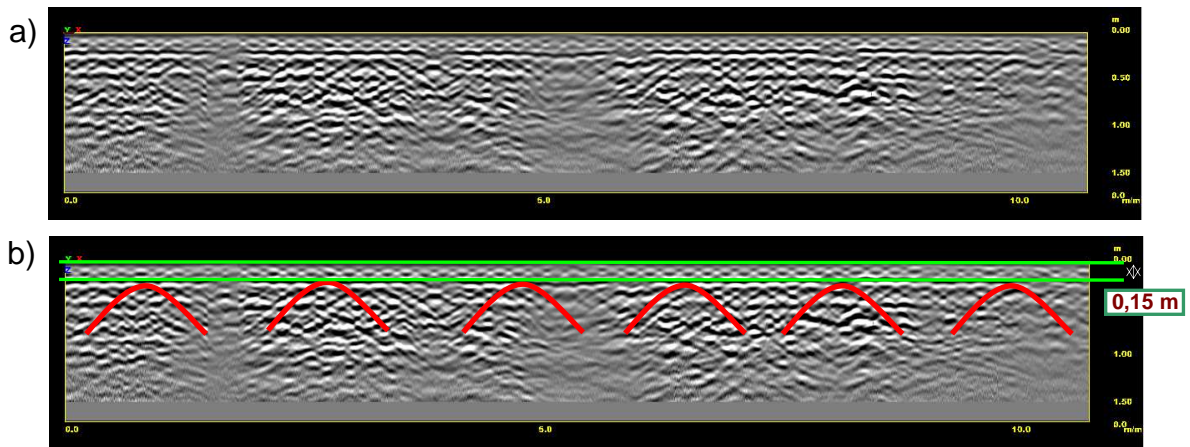


Figura 14: a) Perfil de prospección A, b) Ubicación sobre el perfil de losa de calzada y vigas pretensadas longitudinales

Mientras que en el perfil correspondiente a la exploración a mitad de la luz (Figura 15), abarcando a la viga transversal en toda su longitud, se aprecia también en detalle la losa de la calzada y su armadura y además de la presencia de las seis vigas longitudinales se observa el ala superior de la viga pretensada

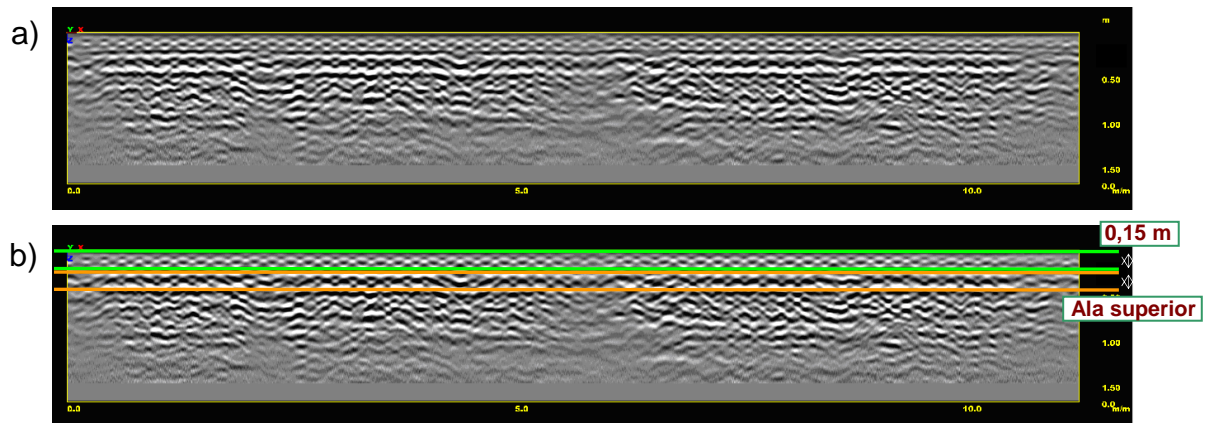


Figura 15: a) Perfil de prospección B, b) Ubicación sobre el perfil de losa de calzada y viga pretensada transversal.

Los análisis en los otros perfiles (C y D) resultan análogos a los descritos anteriormente por lo que su desarrollo no se considera necesario.

## 7. Consideraciones finales

Los ensayos de vibración ambiental realizados en este tipo de estructuras, resultan convenientes, rápidos y económicos.

El análisis modal experimental y numérico presentado en este trabajo permite realizar un estudio de las propiedades dinámicas de puentes de similares características ubicados sobre la Autopista Ruta Nacional 9.

El análisis con elementos finitos se realizó reflejando las condiciones reales de la estructura, lográndose una buena correlación con resultados experimentales, en tanto que el análisis modal experimental a través de los ensayos de vibración ambiental proporciona una fuente importante de información para ajustar los modelos analíticos.

De la comparación de los resultados experimentales obtenidos en las dos etapas de medición año 2007 y año 2013, se concluye que existe una diferencia en la frecuencia fundamental del orden del 6%. Esta diferencia puede deberse a diferentes factores: a) errores en la medición (condiciones ambientales, calibración equipo, horas pico-valor, ruidos, etc.); b) Variación en las condiciones del apoyo: esto merece un estudio más detallado que se realizará en presentaciones futuras; c) Posibles degradaciones y/o discontinuidades en el hormigón ya sea del tablero o de las vigas transversales. En este trabajo, se considera ésta última alternativa y se concluye que para una variación del orden del 11% en el módulo del hormigón se obtiene una variación en la 1ra frecuencia del 6%.

Por otro lado, el análisis de los radargramas obtenidos con el equipo de georadar permitió verificar los espesores de losas de tableros, la ubicación de las vigas transversales y longitudinales y la correspondiente posición de sus armaduras y separación.

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

El estudio presente y la medición del 2007, servirán para monitoreos estructurales a largo plazo.

## 8. Referencias

[1] Toledo M. W. E., Bellomo F., Nallim L. G., Gea S., Caro R., 2007. "Análisis de características dinámicas de estructuras". VII Encuentro de investigadores y Profesionales Argentinos de la Construcción – EIPAC 2007.

[2] Toledo M. W. E., Quinteros R., Pérez G., 2013. "Análisis y evaluación del comportamiento estructural de dos puentes ubicados sobre Ruta Nacional N° 9, IX Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA – CODINOA 2013

[3] Kinemetrics Inc., *Altus Digital Recorder User's Manual*, Kinemetrics Inc. USA, 2002.

[4] Ewins D.J., *Modal testing Theory, practice and application*. Research Studies Press LTD. England, 2000.

[5] Kinemetrics Strong Motion Analyst, 2004. Document 302415. Revision G.

[6] SAP 2000 Versión 14, 2010. "Linear and Nonlinear static and Dinamic Analysis

and Design of Three-Dimensional Structures". Computers and Structures, Inc. Berkeley, USA.

[7] Macdonald J.H.G and Daniell W:E., 2005. "Variation of modal parameters of a cable-stayed bridge identified from ambient vibration measurement and FE modelling". Engineering Structures, 27, 1916-1930.

[8] 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.

[9] 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

[10] Gea S., Quinteros R., Nallim L., "Control del proceso de deshumidificación de muros con georradar. Un edificio patrimonial como caso de estudio". Revista ALCONPAT Colombia. Volumen 4:1, 2014.