

MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES COMO TÉCNICA DE INSPECCIÓN DE PUENTES

Ingeniero Civil María H. PERALTA, Ingeniero Civil Norma L. ERCOLI
Departamento de Ingeniería Civil- Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del
Centro de la Provincia de Buenos Aires, -Olavarría- Buenos Aires
Ingeniero en Construcciones Raúl O. BACCHIARELLO Profesional Dirección de
Hidráulica, Municipalidad de Olavarría
Profesional CONICET Salvador LA MALFA
Instituto de Mecánica Aplicada, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca.

RESUMEN

En los últimos años las condiciones del tránsito han variado sustancialmente, debidas a incremento de las cargas y de las velocidades de circulación. Lo indicado provoca problemas en las estructuras de algunos puentes diseñados con criterios acordes a las condiciones de circulación de hace 5 décadas. Estos problemas no sólo se relacionan con la seguridad estructural sino también con el confort humano.

De acuerdo a lo indicado es de importancia la inspección de puentes a efectos de evaluar su integridad estructural.

El objetivo del presente trabajo es presentar la experiencia particular desarrollada en Olavarria, en el marco de las tareas de inspección solicitadas por el Municipio, sobre un puente de hormigón armado existente sobre el Tapalque. La misma comprendió la evaluación experimental "in situ" de las amplitudes vibratorias existentes en diferentes partes de la estructura, bajo diferentes condiciones de tránsito actuales, y la posterior calibración de modelos computacionales. Los resultados de las mediciones efectuadas se comparan con normas y criterios existentes a nivel internacional. De dicha comparación surge la necesidad de tomar medidas de diferente índole a efectos de asegurar su integridad.

ABSTRACT

In the last years traffic conditions have changes due to load increase and circulation speed. This causes problems in some bridges structures designed according to traffic criteria used five decades ago. These problems are related both to the safety of the structure and human comfort.

The inspection the bridges become substantial in order to evaluate their structural integrity.

The objective or the present paper is to present the particular experience developed in Olavarría, related to the inspection on the evaluation in situ of the vibration amplitudes in different parts of the structure, under different actual traffic conditions and later calibration of the computer models. The result of the measurements, already done, are being compared to the codes and existing worldwide criteria. From that comparison, the need of actions that guarantee the structural safety appears.

INTRODUCCIÓN

Diversos casos de colapsos ocurridos a nivel mundial en puentes actualmente, ha influenciado en la toma de conciencia de la importancia de un monitoreo y mantenimiento de este tipo de estructuras.

También muchas estructuras, cumpliendo el límite de su vida útil, han sufrido deterioro, en parte por no contar con las tareas de mantenimiento que deben realizarse. Así han visto afectada su rigidez original y por lo tanto resultando más vulnerables a las acciones dinámicas, razón por la cual se hace necesaria su reparación a efectos de que puedan continuar funcionando según lo establecido en el proyecto.

Ello implica la necesidad de monitorear el estado de las estructuras con la finalidad de detectar posibles niveles de daño, y planificar las reparaciones necesarias sin llegar a un estado de las mismas que impidan su uso. Los códigos modernos establecen pautas para efectuar las mencionadas tareas de control con la finalidad de garantizar la vida en servicio de las estructuras, según el destino de las mismas. “La prevención en la etapa de utilización debe orientarse a establecer un programa mínimo de conservación, disponer los recursos suficientes, realizar inspecciones y trabajos de mantenimiento periódicos que permitan sostener en el tiempo asignado de vida útil una prestación acorde a la establecida”, Husni ,R¹.

En el diseño de las estructuras correspondientes a los puentes son importantes los efectos de interacción dinámica entre los vehículos y la estructura, incluyendo las características del pavimento. Además las vibraciones estructurales ocurren debido al movimiento de los vehículos sobre las estructuras con grados de a flexibilidad excitando modos naturales de vibración. Las irregularidades debidas a los baches del pavimento, a los desniveles pronunciados de los mismos, conducen a impactos que amplifican las vibraciones.

Diversas metodologías de detección de daño han sido propuestas² entre las que pueden mencionarse: inspección visual, métodos no destructivos y modernos métodos basados en dinámica estructural. La medición y análisis de vibraciones es utilizada, en conjunto con otras técnicas, para el diagnóstico de fallas y evaluación de la integridad de máquinas y estructuras.

La aproximación experimental a las vibraciones en estructuras es la tendencia actual, tanto en la práctica profesional como en la reglamentación vigente y futura.

La identificación de daño estructural a través del análisis de los cambios de las características dinámicas, por otro lado, provee un camino de evaluación del estado global³ de la estructura, por lo cual esta metodología se constituye en una interesante herramienta de auscultación.

Ante una patología estructural es importante primero observar el daño, luego localizarlo y finalmente dar una idea de la severidad del mismo³. La presencia de fisuras o daño localizado en una estructura reduce la rigidez incrementando el amortiguamiento en la misma. La teoría de dinámica estructural indica que una reducción de la rigidez se asocia con una disminución en las frecuencias naturales. La técnica de detección de daño a partir de la disminución de las frecuencias

naturales es muy utilizada en tipologías estructurales de importancia como las correspondientes a estructuras offshores y a puentes de grandes luces.

Complementariamente y, como sustento de lo antes indicado, existen diversas metodologías teóricas y/o numéricas, entre las que puede mencionarse el análisis por el Método de los Elementos Finitos, que permiten valorar la sensibilidad de los cambios en las frecuencias naturales para medir daño. Los métodos numéricos constituyen una herramienta de utilidad a efectos de determinar valores de referencia de los elementos que se deseen evaluar. No obstante, es de importancia la calibración de los modelos numéricos, cuyo análisis dinámico permitirá arribar a valores de frecuencias que servirán de base para la contrastación con los valores de dichas frecuencias medidas en el elemento. Para dicha calibración es significativo el aporte de los resultados obtenidos a partir de los ensayos experimentales en los laboratorios y “en situ”, de estructuras mediante el uso de técnicas dinámicas no destructivas para la medición de frecuencias propias y respuesta estructural.

En el presente trabajo se expone la experiencia realizada en el Área de Estructuras de la Facultad de Ingeniería de la UNCPBA, con uno de los puentes inspeccionados y las acciones de monitoreo, ensayos experimentales “in situ”, y modelos computacionales desarrollados, con la finalidad de determinar el estado actual de la estructura y la afectación de su capacidad portante, mediante la utilización de criterios establecidos en códigos internacionales al efecto.

ANTECEDENTES

Por solicitud de la Secretaría de Obras Públicas de la Municipalidad de Olavarria se firma un convenio de consultoría con la Facultad de Ingeniería de la UNCPBA, para realizar tareas de monitoreo sobre los puentes existentes sobre el Arroyo Tapalque, curso de agua que atraviesa el micro centro de la ciudad. En el sector del ejido urbano existen diez puentes de hormigón armado y pretensado, correspondiente a diferentes épocas de construcción, con edades de vida en servicio entre 20 y 50 años.

En particular durante la inspección “in situ” del puente de hormigón armado, construido en la década del 60, se perciben vibraciones de significativa intensidad. La Dirección de Hidráulica, en el marco del convenio, solicita la Evaluación, Diagnóstico y Pautas de Reparación Estructural del mencionado puente, la cual se viene desarrollando desde mediados del año 2007.



Figura 1- Vista del puente sobre el Arroyo Tapalqué

DESCRIPCIÓN DE LA TIPOLOGIA ESTRUCTURAL

La Dirección de Hidráulica de la Municipalidad de Olavarría, aporta documentación técnica correspondiente al puente. Se dispone de planos de la estructura de hormigón armado que incluyen: planta, vista, cortes, encofrados y armaduras de la superestructura e infraestructura. Esta documentación técnica fue analizada y considerada como antecedente previo a las siguientes etapas ejecutadas.

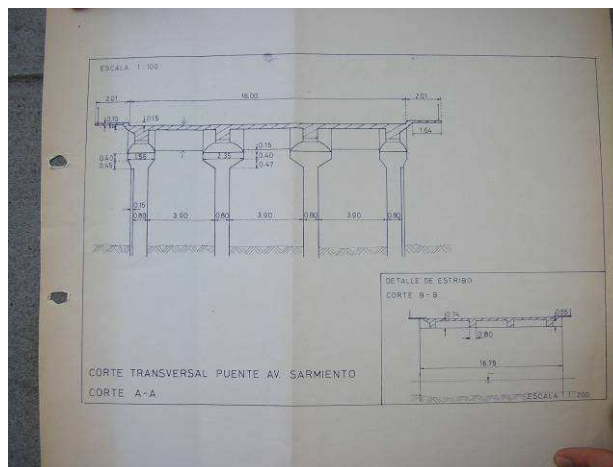


Figura 2 - Plano de ubicación, corte longitudinal y transversal

La inspección visual "in situ" permite corroborar el esquema estructural, según Figura 2. Está constituido por un tablero formado por losa llena sobre emparrillado de vigas longitudinales de sección variable y vigas transversales, hormigonadas "in situ". Las vigas longitudinales son continuas de tres tramos de 18 m; 23,40 y 18 m de luz respectivamente. Las descargas intermedias se realizan a través de vigas transversales de sección rectangular a 8 columnas de hormigón armado de sección rectangular variable comenzando en la parte inferior con una sección de 0.70 m x 0.80 m y llegando la misma en la parte superior a 0.50 m x 0.70 m cada una. La altura promedio de las columnas es de 7.30 m. Las descargas extremas se producen sobre estribos constituidos por tabiques y contrafuertes de aproximadamente 6.50 m de altura y de espesor 0.20 m.

En primera instancia y a partir de estos datos se generaron los modelos tridimensionales, que sirvieron como antecedente para la generación del modelo numérico computacional, según Figuras 3, 4 y 5.

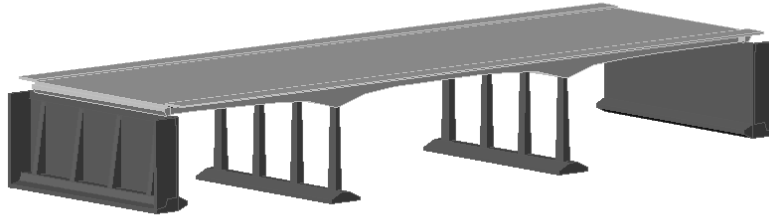


Figura 3 - Tipología estructural del puente. Tablero superior, vigas longitudinales y transversales, apoyos intermedios y estribos laterales.

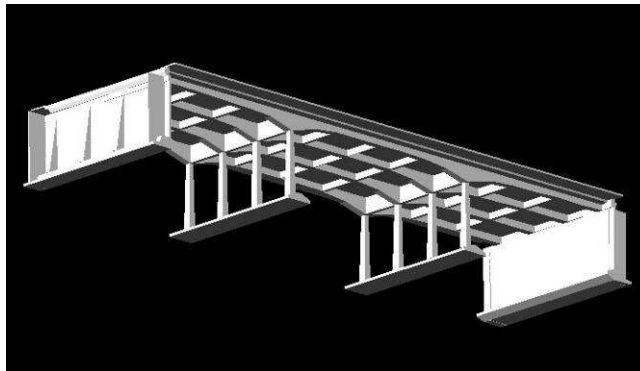


Figura 4 - Esquema estructural de vigas longitudinales y transversales, apoyos intermedios y estribos del puente.

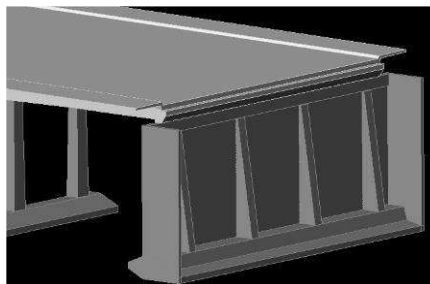


Figura 5 - Detalle del estribo y losa de tablero.

INSPECCIÓN Y DIAGNÓSTICO

La Inspección Visual y el análisis de la información disponible, permiten indicar que:

- No se han materializado en obra las juntas de dilatación indicadas en el plano correspondiente perteneciente a la documentación técnica de proyecto, lo que provoca el correspondiente deterioro de la calzada en esas zonas. Figura 6.



Figura 6 - Deterioro de la calzada, juntas de dilatación insuficiente y sin mantenimiento.

- No se cumplen las recomendaciones para mecanismos de apoyo recomendados para este tipo de estructuras. La escasa junta bituminosa observada permite indicar que se trata de un apoyo fijo. Este tipo de apoyo deber ser capaz de absorber, además de las fuerzas verticales, las fuerzas horizontales correspondientes a fuerzas de frenado, de viento, fuerzas debidas a transiciones de calzada, por variaciones térmicas, fuerzas debidas a deformaciones elásticas horizontales de las columnas.
- La vibración percibida por las personas al paso de vehículos es indicativa de una gran flexibilidad del tablero superior. Estas vibraciones de la superestructura, son transmitidas a la infraestructura dado lo indicado en el punto anterior.
- La vibración transmitida, sumada a las otras fuerzas horizontales mencionadas no puede ser absorbida en su totalidad por la infraestructura, lo que estaría motivando el deterioro observado en uno de los estribos.
- Se observa un deterioro de la estructura localizado en el estribo N-O que soporta el tablero del puente, según Figura 7, Existe una fisura horizontal longitudinal a una altura aproximada desde el tablero del puente de 1.20 m y otras fisuras inclinadas a 45° en las zonas de apoyo de las vigas longitudinales. El descascaramiento se observa en correspondencia con las descargas de las vigas longitudinales laterales. Los apoyos de la superestructura sobre la infraestructura (estribos) son fijos, se observa una junta bituminosa de escaso espesor.



Figura 7 - Vista del estribo del puente nor- oeste. Fisuras y descascamientos

El tipo de deterioro observado permite indicar que existe compromiso estructural por lo cual debe plantearse un *PLAN DE REPARACIONES* adecuado, previo análisis, para restituir un adecuado comportamiento estructural al puente. El Plan de acciones contempla:

- Medición de parámetros dinámicos en infraestructura y superestructura para diferentes condiciones de tránsito (velocidades, cargas) previo a la ejecución de reparaciones.
- Reparación del estribo afectado, sellado de la fisura y posterior monitoreo.
- Medición de parámetros dinámicos en infraestructura y superestructura para diferentes condiciones de tránsito (velocidades, cargas) posterior a la ejecución de reparaciones. Estas mediciones pueden motivar recomendaciones de uso del puente tales como limitaciones de velocidad en las cercanías de los accesos al mismo.

ANÁLISIS NUMÉRICO- COMPUTACIONAL

Es de destacar, que dada la naturaleza global y heterogénea del problema, tales como tipo de tránsito, tipo de pavimentos y estado, porte y velocidad de los vehículos, tipo de estructura del puente y fundaciones, es dificultoso elaborar un modelo dinámico teórico, ya que el mismo debiera predecir numéricamente la influencia sobre la percepción de vibraciones que sienten los peatones, ante el cambio de alguna de las muchas variables que regulan este problema dinámico. Así lo recogen los Códigos y reglamentaciones actuales, sugiriendo la vía experimental y el apoyo en la normativa vigente para la evaluación de la magnitud de las vibraciones

Uno de los factores es el cambio en la naturaleza e intensidad de las cargas. Con respecto a las fuerzas dinámicas producidas por vehículos, el CEB 209⁴, en el Capítulo 4.1, señala la complejidad de este sistema dinámico, en cuanto a su definición y su interacción con la estructura. La magnitud y frecuencia de la excitación depende de la masa del vehículo, de la velocidad, de las características y rugosidad del pavimento, y la rigidez de la estructura y propiedades del suelo de fundación. Las aceleraciones y desaceleraciones de los vehículos generan fuerzas dinámicas que se transmiten en la dirección del vehículo. La definición de la

excitación dinámica que actúa sobre la estructura es uno de los problemas más complejos en estos análisis.

Atendiendo a estas premisas, previo a la evaluación experimental, se procedió a la modelización de la estructura del puente con la finalidad de calcular la frecuencia natural del sistema, para predecir el orden de la misma, a los fines de seleccionar adecuadamente los sensores a utilizar en las mediciones de vibraciones in situ.

Para la implementación del modelo computacional se utilizó el software ALGOR⁵, disponible en el Área de Estructuras. Se generó un modelo espacial, utilizando elementos tipo vigas y placas.

La frecuencia obtenida para el primer modo de vibración, o sea la frecuencia fundamental del sistema es de 2.9 Hz, según Figura 8.

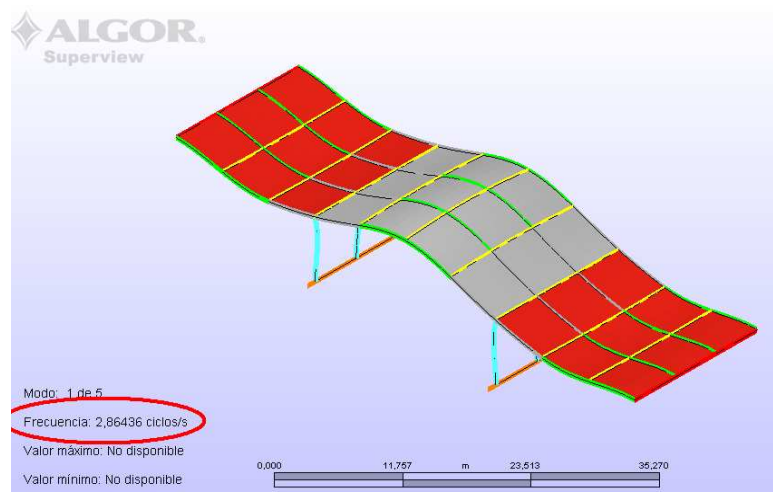


Figura 8 - Modelo numérico- computacional. Primer modo de vibración -Frecuencia fundamental

Según el CEB 209⁴, en el Capítulo 4, Bridges, de W. Ammann, un estudio desarrollado en un importante número de puentes carreteros de hormigón armado, en el rango de frecuencias entre 2 y 4 Hz, se da el mayor incremento dinámico. En este caso particular, se tiene que el valor de frecuencia fundamental obtenida del modelo computacional está en dicho intervalo.

MEDICIONES EXPERIMENTALES: Comportamiento en servicio.

Las tareas de medición de vibraciones “in situ” fueron desarrolladas durante el segundo semestre de 2007. El objetivo es el de cuantificar las amplitudes vibratorias existentes en distintas partes de la estructura bajo diferentes condiciones de circulación vehicular a efectos de su posterior análisis y comparación con Normas y criterios utilizados a nivel internacional.

Medición sobre el tablero del puente

A efecto de evaluar el comportamiento con el tránsito, se procedió a permitir la normal circulación de vehículos en las dos direcciones y por otra incluir el transitar de un camión de la Municipalidad de Olavarría con una carga de aproximadamente 10 tn de arena, haciéndolo circular bajo dos condiciones: 1) a una velocidad de 30 Km/hora y 2) partiendo de marcha detenida.

En toda la longitud del puente fueron ubicados tres puntos centrales correspondientes a los tres cuadros que éste posee. En cada uno de dichos puntos se obtuvieron en forma simultánea mediante un adquisidor de datos que utiliza un acelerómetro triaxial, las aceleraciones vibratorias (m/seg^2) en tres direcciones utilizando lo indicado en Figura 9. Por otra parte, paralelamente con un segundo equipo, mediante la colocación de un acelerómetro y un transductor del tipo sísmico, se obtuvieron las amplitudes y frecuencias predominantes (FFT) en la dirección considerada como Z.

Por otra parte era registrado el instante de ingreso del camión, como así también la eventual circulación de cualquier otro vehículo de gran porte (camiones, colectivos, etc.) con el objeto de identificar la correspondencia con los registros. El registro continuo en cada punto era de aproximadamente 4/5 minutos, lapso éste suficiente para permitir la circulación del camión en ambas direcciones.

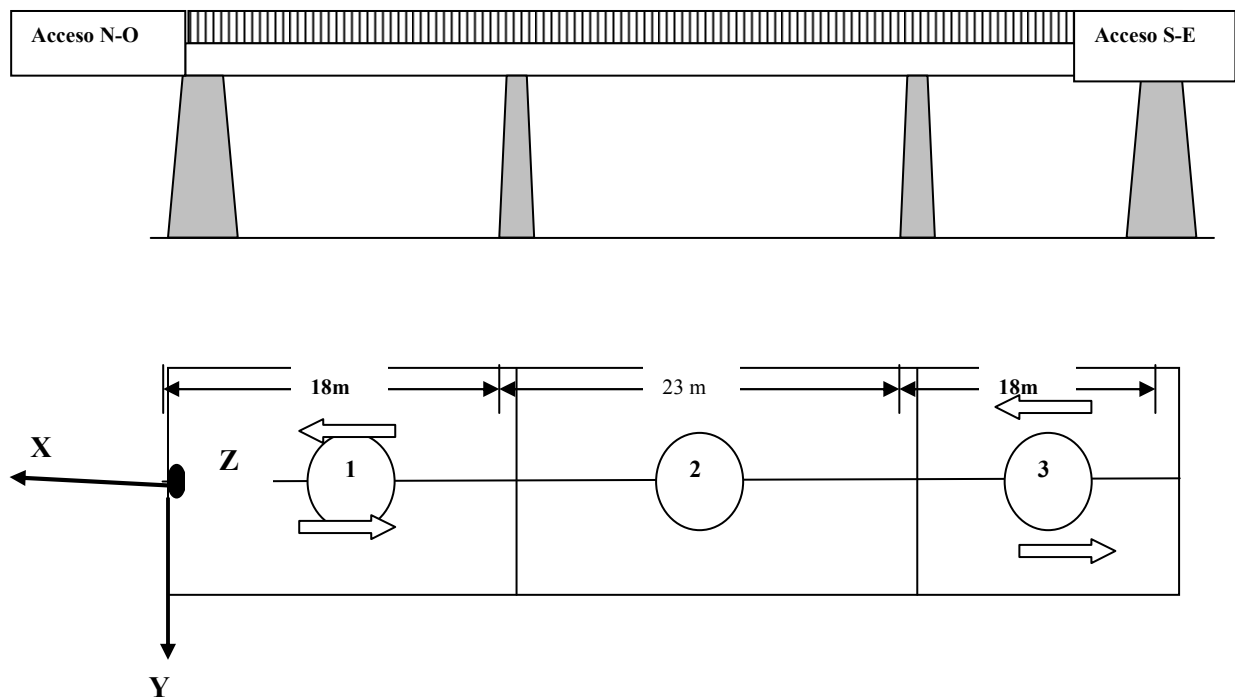


Figura 9- Distribución y direcciones de los puntos de medición 1,2 y 3

Medición sobre los estribos

A raíz de la fisura que posee el estribo del sector Norte-Oeste, se optó por realizar mediciones utilizando el acelerómetro triaxial en la parte superior de la fisura

(zona apoyo puente) y luego debajo de fisura, bajo condiciones normales de circulación sobre el puente.

El otro punto de medición corresponde en el estribo ubicado sobre sector Sur-Este. El criterio utilizado en las direcciones de medición, es indicado en el croquis de Figura 10.

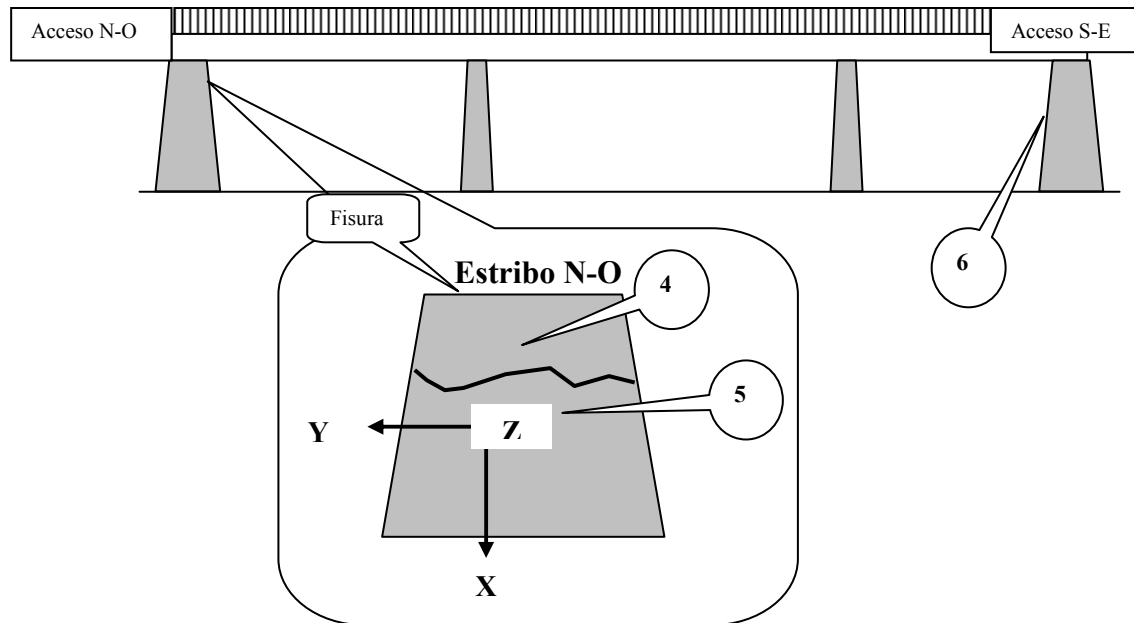


Figura 10-Distribución y direcciones de los puntos de medición 4,5 y 6 sobre los estribos

RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

La Figura 11, muestra la gráfica obtenida en el Punto 1. Dentro de dicha gráfica pueden observarse tres registros correspondientes a la dirección X (rojo), Y(verde) y Z (azul), con las amplitudes expresadas en m/seg^2 (aceleración vibratoria) identificando el ingreso del camión N a S (norte a sur) y S a N (sur a norte), como así también el día hora, minutos y segundos en que fue realizada la medición.

Sobre el tablero

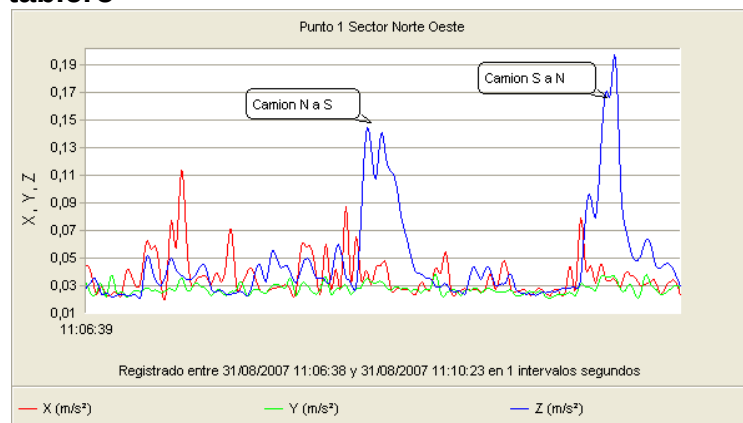


Figura 11-Medición sobre puente Punto 1

La Figura 12 y corresponde a lo obtenido sobre el puente en el Punto 2, con las mismas consideraciones realizadas en la anterior. La figura 13 ídem Punto 3.

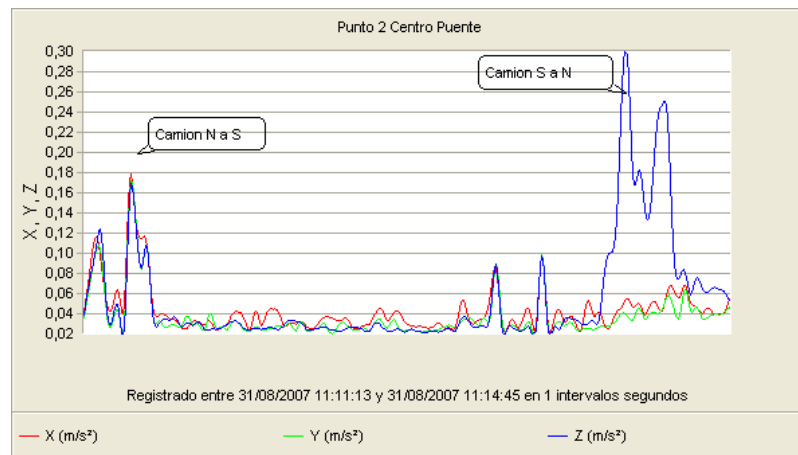


Figura 12- Medición sobre puente Punto 2

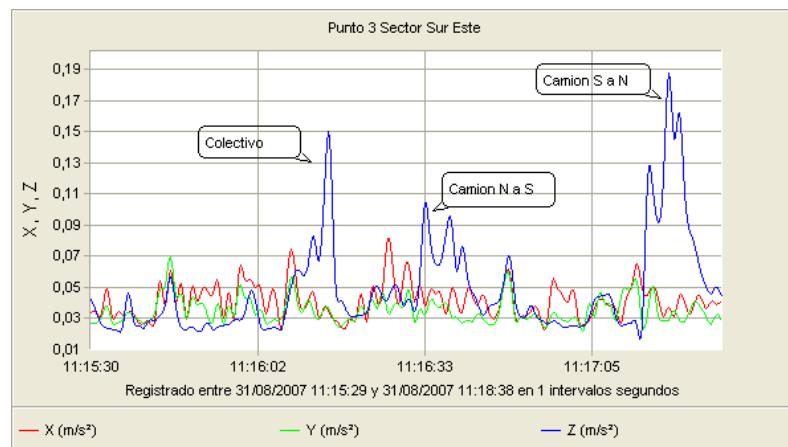


Figura 13 -Medición sobre puente Punto 3

La Figura 14, corresponde a uno de los espectros que fueron obtenidos sobre el puente, en este caso en el Punto 2, con el segundo equipo medidor y analizador de vibraciones. En él puede observarse cuando es excitado por el tránsito vehicular, que la frecuencia predominante es de aproximadamente 3,204 Hz., dicho valor corresponde a uno de los modos normales de vibración del puente. Este valor es comparable con el obtenido con el modelo numérico- computacional.

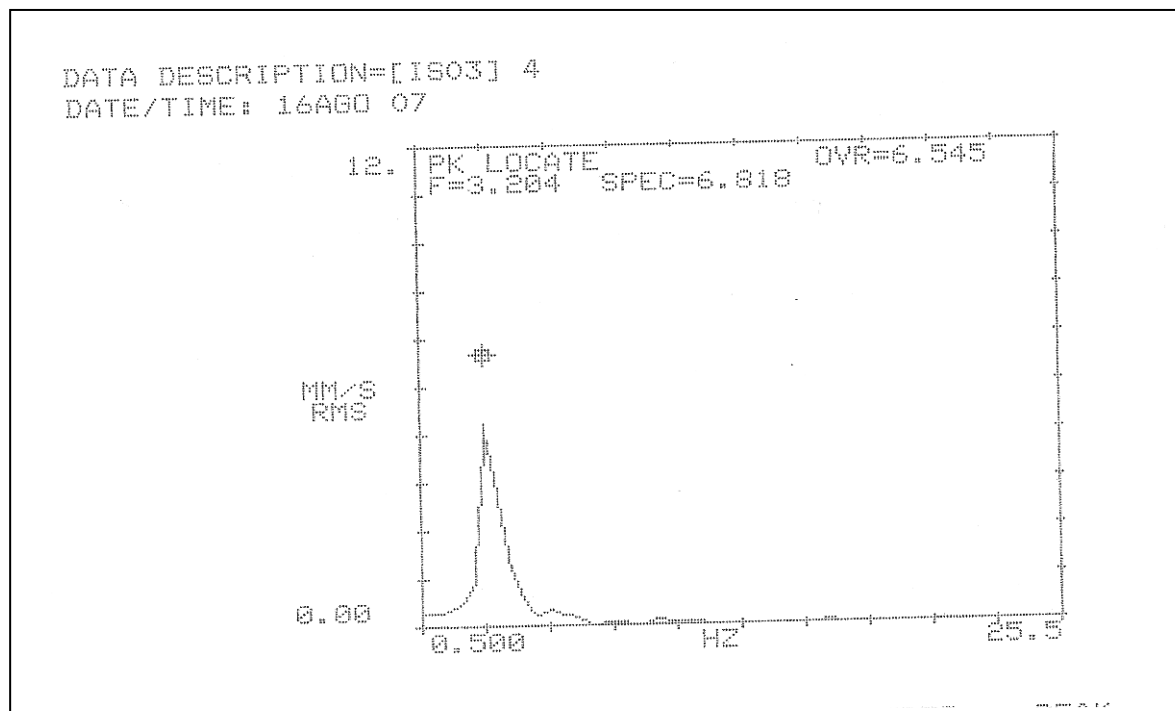


Figura 14- Espectro vibratorio frecuencia predominante

La Figura 15 corresponde a las amplitudes vibratorias obtenidas en el Punto 2, pero haciendo que el camión inicie su marcha desde la posición detenida antes del ingreso al puente. Esto simularía una condición tal como si se dispusiera de reductores de velocidad al ingreso del puente. El propósito fue de evaluar el efecto que produce la velocidad de circulación sobre las vibraciones registradas.

La Figura 16 corresponde al Punto 2 pero en este caso el equipo está realizando una integración por lo tanto los registros están expresados en unidades de velocidad vibratoria m/seg. El objeto de utilizar dichas unidades es el de poder emplear Normas y criterios de referencia expresados en mm/seg en el posterior análisis y comparación. (El valor indicado m/seg. para convertirlo en mm/seg deberá multiplicarse por 1000)

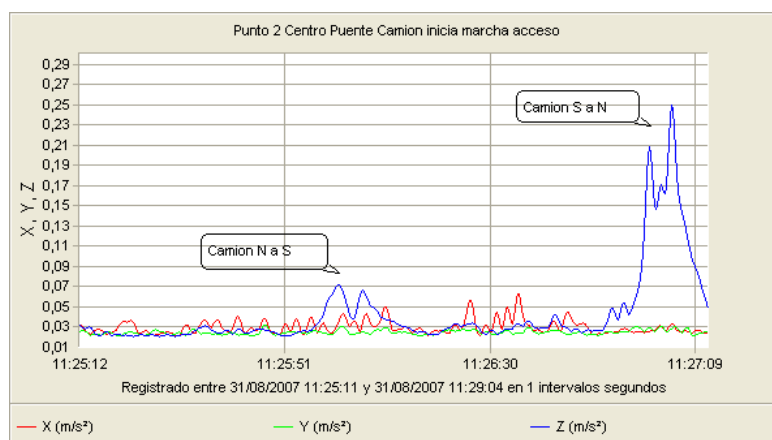


Figura 15- Ingreso camión con marcha detenida

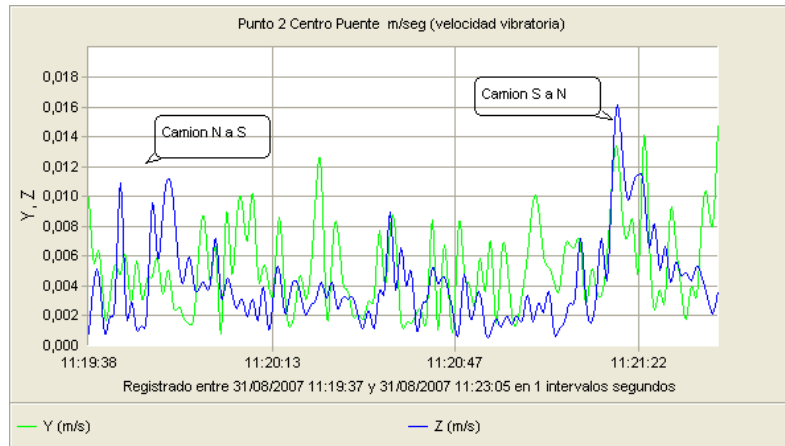


Figura 16-Mediciones Punto 2 en unidades de velocidad vibratoria m/seg rms

Sobre los estribos

Para evaluar el efecto del tránsito vehicular y del camión se obtuvieron sobre los estribos, los niveles de aceleración vibratoria con el acelerómetro triaxial. La Figura 17 muestra los registros obtenidos en la parte superior de la fisura y la Figura 18 en la parte inferior del estribo Noroeste. La Figura 19 corresponde al estribo Sureste.

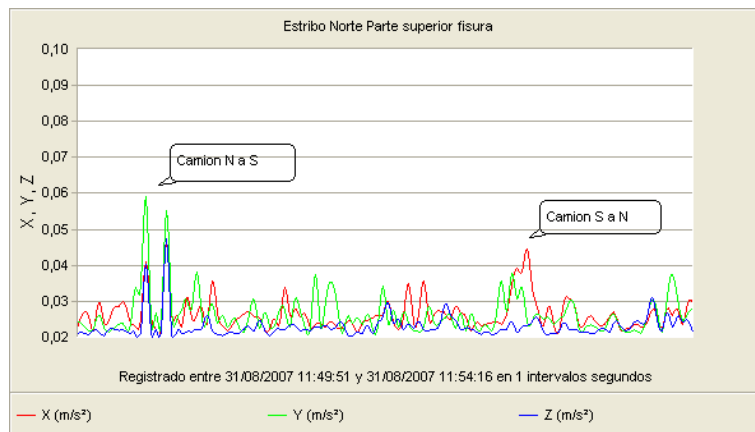


Figura 17- Mediciones en parte superior de la fisura

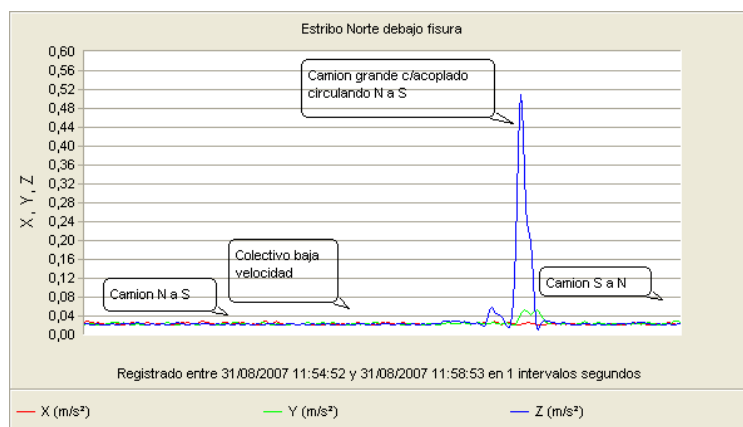


Figura 18- Mediciones en la parte inferior de la fisura

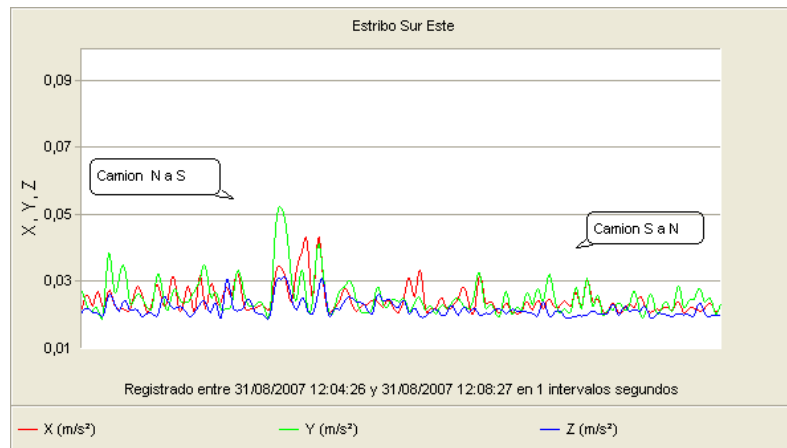


Figura 19- Registro de mediciones en el estribo Sureste

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS MEDICIONES EXPERIMENTALES

Los resultados obtenidos en las mediciones realizadas, muestran una dependencia de las amplitudes vibratorias con las condiciones del tránsito en lo relativo a velocidad y carga de la circulación vehicular. El nivel vibratorio como puede observarse, resulta superior cuando el camión o vehículo pesado realiza el ingreso al puente sobre el sector sur este.

Las amplitudes vibratorias obtenidas sobre y debajo la fisura del estribo norte, como así también del estribo sur en momentos de circulación del camión y tránsito normal resultan normales, pero la circulación de un camión de gran porte con acoplado generó un pico vibratorio de alta amplitud, según la Figura 18.

Es de aclarar que en momentos de transitar sobre el puente el mencionado camión con acoplado, se estaban realizando mediciones en la parte inferior de la fisura, desconociendo por lo tanto qué efecto y amplitudes poseía el estribo sobre la fisura como así también el resto del puente. Esto hace suponer que si la circulación del camión cargado utilizado como testigo, no genera grandes amplitudes en los estribos pero sí manifiesta amplitudes de riesgo sobre el puente, lo observado sobre el estribo con la circulación del camión con acoplado hace presumir que el efecto sobre el puente debería ser muy superior.

CRITERIOS DE LOS CÓDIGOS- Normas y criterios de referencia

Para establecer un criterio de evaluación por posibles daños estructurales existen una serie de Normas y criterios que expresan valores admisibles y límites vibratorios máximos que podrían dañar una estructura. A efectos del presente análisis se adoptan los criterios establecidos en Normas internacionales (ISO, DIN) que se indican en Gráficos de las Figuras 20 y 21.

En la Figura 20, según Richart⁶, puede observarse los valores expresados en unidades de aceleración m/seg^2 , como así también los niveles de velocidad vibratoria en rms, mm/seg, relacionado con la frecuencia vibratoria y el daño que dicho niveles pueden ocasionar sobre las estructuras.

Como segundo dato sobre la ordenada puede observarse que para el caso de velocidad vibratoria el nivel debería ser inferior a 10 mm/seg, rms

Figure 1 is a log-log plot showing the relationship between Vibration Velocity (mm/s), Acceleration (m/s²), Displacement (mm), and Frequency (Hz). The plot includes curves for Structural damage, Human sensitivity, and Machine vibration severity, with various threshold lines for damage and perception.

Y-axis (left): Velocity (mm/s) from 0.001 to 1000. Acceleration (m/s²) from 0.0001 to 10. Displacement (mm) from 0.001 to 1000.

X-axis (bottom): Frequency (Hz) from 1 to 1000.

Structural damage curves (ISO 2372 (1974) and ISO 2372 (1974)):

- 100 mm/s: Destructive
- 10 mm/s: Wall damage
- 1 mm/s: Cracks in render/plaster (No damage)
- 0.1 mm/s: Minor damage
- 0.01 mm/s: Threshold
- 0.001 mm/s: Reduced comfort 24-h exposure
- 0.0001 mm/s: Threshold of perception

Human sensitivity curves (ISO 2372 (1974) and ISO 2372 (1974)):

- 100 mm/s: Impermissible
- 10 mm/s: Unsatisfactory
- 1 mm/s: Satisfactory
- 0.1 mm/s: Good
- 0.01 mm/s: Environmental vibration satisfactory, relevant IT laboratories
- 0.001 mm/s: Sensitive equipment

Machine vibration severity curves (ISO 2372 (1974)):

- 100 mm/s: 10 m/s²
- 1 mm/s: 10 m/s²
- 0.1 mm/s: 10 m/s²
- 0.01 mm/s: 10 m/s²
- 0.001 mm/s: 10 m/s²

Other curves:

- 100 mm/s: 10 m/s²
- 1 mm/s: 10 m/s²
- 0.1 mm/s: 10 m/s²
- 0.01 mm/s: 10 m/s²
- 0.001 mm/s: 10 m/s²

Figure 4.4. Vibration criteria for machinery, structures, sensitive equipment, and humans.

Figura 21

Range	rms velocity, mm/s	Effect
I	below 2.5	damages not possible
II	2.5-5.0	damages very improbable
III	5.0-10.0	damages not probable
IV	over 10	damages possible stress check necessary

The safe limit appears to be somewhere below 10 mm/s rms velocity. Constant rms velocity lines of 2.5, 5 and 10 mm/s are plotted in Figure 2 with broken lines.

Figura 22

COMPARACION DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES CON LOS VALORES ESTABLECIDOS EN LOS CODIGOS

Es notable la diferencia de los valores de aceleraciones verticales observadas, según Figuras 11,12 y 13, en los diferentes puntos medidos según el camión cargado testigo, ingreso de S a N o de N a S. Los valores de todas las mediciones efectuadas superan los valores límites indicados para ambos sentidos de circulación. La diferencia indicada podría estar justificada por el desnivel existente en el acceso sureste entre las losas de aproximación y la losa que constituye el tablero del puente, lo que provoca un impacto del vehículo sobre el tablero en el momento del acceso al puente.

La medición indicada en Figura 14, simulando marcha a partir de una detención inducida, muestra una considerable disminución de las aceleraciones verticales cuando el camión circula de N a S observándose valores dentro de los rangos admisibles. Dicha disminución es despreciable cuando el camión circula de S a N. Las aceleraciones en X e Y también disminuyeron hasta casi anularse.

Las mediciones indicadas en Figuras 17, 18 y 19 muestran que tanto las amplitudes vibratorias obtenidas sobre y debajo de la fisura del estribo Noroeste como las obtenidas en el estribo Sureste se encuentran en rangos admisibles para tránsito normal e incluso para la circulación del camión cargado. Esto no es así, cuando circula un camión cargado con acoplado que produce un pico vibratorio de alta amplitud que se encuentra fuera de los límites admisibles.

El análisis de los datos aportados por las mediciones efectuadas permite indicar que el puente se encuentra **en zona de trabajo estructural crítica**. Esto hace que el puente esté sometido a aceleraciones y ciclos de cargas y descargas que hay que atenuar y controlar. Las mediciones vibratorias varían con la velocidad de circulación y el peso de los vehículos que transitan.

Lo señalado precedentemente permite indicar que el puente analizado presenta, por un lado, un comportamiento flexible de la superestructura para las condiciones actuales de cargas y velocidades del tránsito. Por otro lado, existe una transmisión de las vibraciones, por efecto del tránsito, a la infraestructura que se amplifica para condiciones de tránsito con altas velocidades y cargas.

PROPUESTAS DE ATENUACION DE LAS VIBRACIONES

Lo anteriormente expuesto permite indicar las siguientes acciones en la estructura del puente analizado y sus adyacencias ***recomendándose su ejecución en lo inmediato:***

1. Rehacer, a efectos de disminuir el impacto de los vehículos en el acceso S-E, las losas de acceso en dicho extremo. Para ello se considerará una pendiente acorde para enlazar el pavimento de la avenida con el nivel superior del estribo para lo cual se corregirán al menos dos losas adyacentes.
2. Limitar la carga y la velocidad de circulación de los vehículos. A tal fin, se recomienda no permitir el tránsito de camiones cargados con acoplado.
3. Monitorear el comportamiento de la fisura del estribo N-O posterior a la realización de una reparación que actuará como testigo.
4. Se sugiere la inspección periódica de todos los elementos del puente a efectos de detectar otros posibles daños posteriores a esta etapa.
5. Luego de ejecutadas las acciones indicadas precedentemente se sugiere repetir las mediciones vibratorias para evaluar el nivel de incidencia en el comportamiento estructural del puente.

ESTUDIO EXPERIMENTAL A POSTERIORI DE LAS REPARACIONES

Una vez efectuadas las tareas de construcción de las losas de acceso, en el sector sur este, y la reparación de la fisura del estribo, se procedió a realizar nuevas mediciones de vibraciones, siguiendo las mismas premisas en cuanto a tránsito y disposición de los sensores, cuyos resultados se muestran a continuación.

La Figura 23, corresponde al registro obtenido en el Punto 1, después de las reparaciones. La Figura 24 y la Figura 25 muestran las gráficas correspondientes a los puntos 2 y 3 respectivamente.

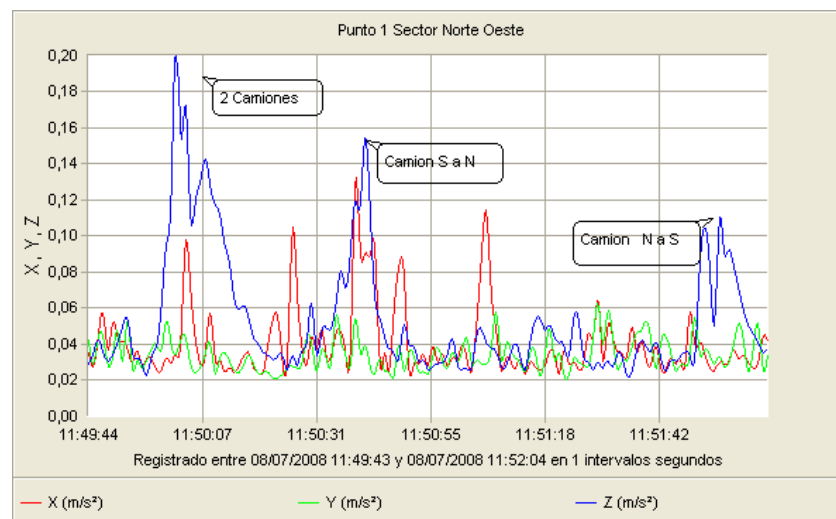


Figura 23- Medición sobre puente Punto 1

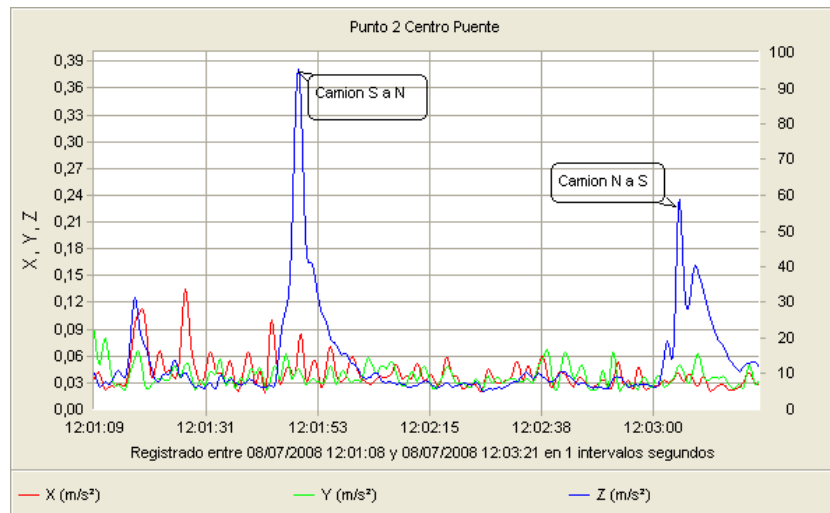


Figura 24 - Medición sobre puente Punto 2

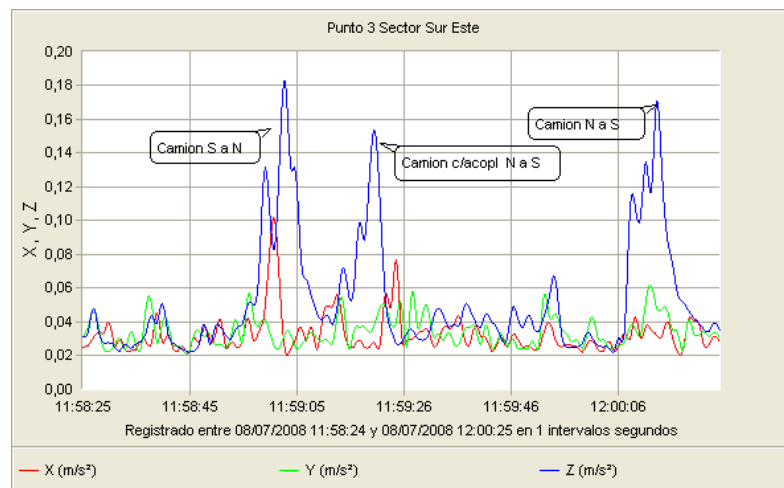


Figura 25 - Medición sobre puente Punto 3

La Figura 26 y 27 muestran los registros obtenidos en los puntos 4 y 5 respectivamente, en los estribos del puente.

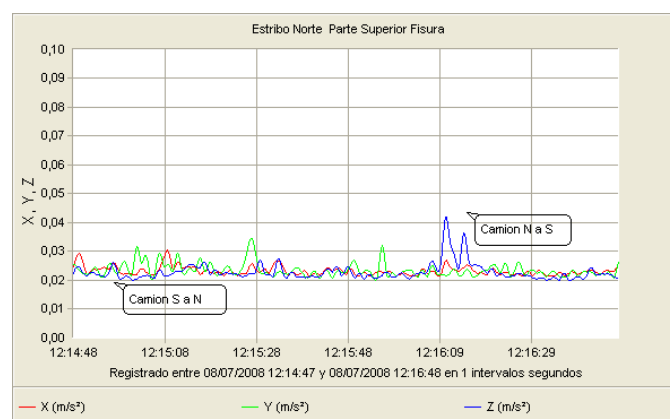


Figura 26 - Medición en el estribo del puente, Punto 4

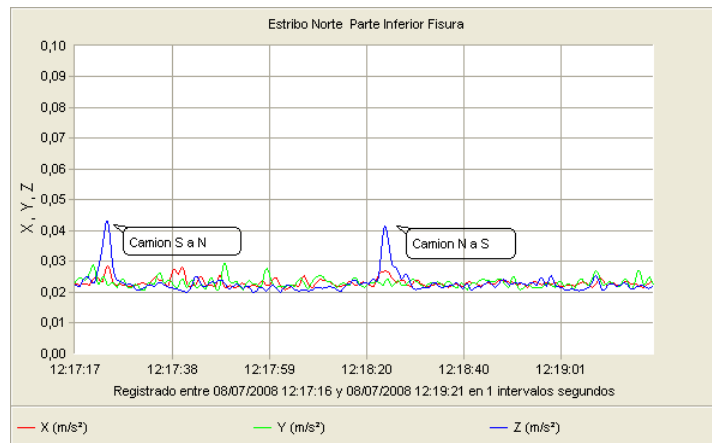


Figura 27 - Medición en el estribo del puente, Punto 5

Comparando los registros obtenidos una vez efectuadas las primeras reparaciones, se observa lo siguiente.

- Los niveles vibratorios registrados en los puntos 1, 2 y 3 correspondientes al antes y después de las reparaciones, registran variaciones, manteniéndose con valores de aceleraciones que superan las admisibles para las cargas de tránsito consideradas.
- Los niveles vibratorios medidos en el estribo Norte, muestran una mejoría. Esto sería un indicativo que los cambios realizados minimizaron las amplitudes sobre el estribo que posee la fisura.
- Se propone limitar la carga y la velocidad de circulación de los vehículos, dado que para vehículos tipo medianos los parámetros asociados a la vibración se encuentran dentro de los rangos admisibles. A tal fin, se recomienda colocar reductores de velocidad en ambos accesos al puente e impedir el acceso de camiones cargados con acoplado.
- Efectuar monitoreos e inspecciones continuas con la finalidad de su control.

CONSIDERACIONES FINALES

En nuestro país, y en particular en nuestra región, se desarrollan escasas tareas de inspección y de mantenimiento durante el período de utilización de las estructuras de los puentes. En el estado actual y dadas las problemáticas detectadas en varias estructuras de puentes son necesarias y justificadas las tareas de monitoreo con periodicidad para los puentes existentes en servicio. En el caso de los nuevos proyectos es importante establecer la necesidad de plantear en el proceso de diseño un programa específico de inspecciones y mantenimiento para ser desarrollado durante la vida útil de la estructura.

Las técnicas dinámicas no destructivas, en particular la medición de vibraciones, es una vía complementaria para evaluar el comportamiento estructural, actualmente sugerida en los códigos internacionales. Estas mismas fuentes plantean criterios para establecer el orden de afectación del comportamiento adecuado de la estructura, a partir de las mediciones experimentales “in situ”.

En el caso particular presentado en este trabajo, del monitoreo efectuado a posteriori de las primeras reparaciones indicadas, surgen mejoras en el

comportamiento en la zona de los estribos. De los registros correspondientes a las mediciones de frecuencia sobre el tablero, la estructura del puente presenta registros de vibraciones en zona no admisibles según los criterios empleados, para tránsito de camiones, o sea vehículos de porte pesado. Esta circunstancia reafirma la necesidad de restringir el tipo de tránsito de acuerdo a la recomendación oportunamente efectuada.

La otra posibilidad que se está analizando actualmente, son posibles soluciones para dotar al puente de la rigidez suficiente con el objetivo de obtener un comportamiento estructural adecuado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Husni, R.- "Fallas y prevención en las estructuras de hormigón" – Revista INGENIERIA ESTRUCTURAL- ISSN 16667- 1511- Año 15- Nº 39- Diciembre 2007.
2. Calavera, J.- PATOLOGÍA DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO Y PRETENSADO". 2º Edición. INTEMAC
3. Peralta, M.H; Ercoli, N. - "Measuring the Dynamic Properties to Detect Structural Damage" - IV International ACI/ CANMET. Conference of Quality of Concrete Structures and Recent Advances in Concrete Materials and Testing, Olinda- Pernambuco State – Brazil SUPPLEMENTARY PROCEEDINGS – Sesión VII noDestructive Test. Setiembre de 2005- pp. 463-475- ISBN 85-98576-08-5.
4. CEB Bulletin D'Information Nº 209 - "VIBRATION PROBLEMS IN STRUCTURES" – Practical Guidelines- Agosto 1991.
5. ALGOR SOFTWARE PACKAGE – V.20
6. Richart F.E. Jr; Hall J.R. Jr, Woods R.D. "Vibrations of soils and foundations". Prentice Hall, 1970.
7. Rades, M. "Vibration Limits for Industrial Buildings" - The Shock and Vibration Digest. Volume 26 Nº3 May/Jun 1994.