

## ESTUDIO NUMÉRICO DE LAS VIBRACIONES INDUCIDAS POR EL TRÁFICO EN ESTRUCTURAS Y ALTERNATIVAS PARA SU MITIGACIÓN

Ricardo D. Quinteros<sup>a</sup>, Sergio Oller<sup>b</sup> y Liz Nallim<sup>a</sup>

<sup>a</sup>CONICET (INIQUI). Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Salta  
Av. Bolivia 5150, Salta, Argentina, [rdquinteros@conicet.gov.ar](mailto:rdquinteros@conicet.gov.ar)  
<http://www.unsa.edu.ar>, <http://www.conicet.edu.ar>

<sup>b</sup>UPC. Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona Tech) – CIMNE, ESPAÑA  
<http://www.cimne.com>, <http://www.upc.edu>

**Palabras clave:** Elementos Finitos, Vibraciones, Mitigación, Tránsito.

**Resumen.** El efecto de las vibraciones del tráfico sobre los edificios es de especial interés ya que las fuentes de vibración se han multiplicado y se han convertido en una preocupación para los residentes de edificios modernos así como para aquellos que trabajan, visitan o desean preservar edificios históricos. Los problemas de las vibraciones inducidas por el tráfico sobre edificios históricos, tienen su origen en características tales como, el deterioro de las calzadas, la concentración de rutas de transporte público en calles adyacentes, etc. El efecto de estas vibraciones ha sido objeto de estudio en los últimos años, estando los trabajos referidos especialmente a determinaciones experimentales, cuyos resultados pueden ser utilizados para evaluar si las mediciones obtenidas se encuentran dentro de valores aceptados por alguna normativa. Estos resultados también pueden utilizarse para calibrar modelos numéricos globales que permitan determinar la influencia de las vibraciones y luego analizar medidas de atenuación. En este trabajo se propone un modelo global de elementos finitos que permite abordar el tratamiento de las vibraciones inducidas por el tráfico en estructuras y analizar diferentes alternativas de solución acordes al lugar de emplazamiento. El modelo global abarca el edificio en estudio, el terreno y las construcciones circundantes, de esta manera se logra tener resultados orientativos del conjunto incluyendo sus condiciones de contorno. Las acciones ocasionadas por el tráfico se establecen a través de impulsos que definen los estados de carga que se aplica al modelo. Finalmente se plantean diferentes alternativas que permiten analizar las opciones para mitigar el efecto de las vibraciones generadas.

## 1 INTRODUCCIÓN

Las vibraciones producidas por el tráfico se suelen caracterizar mediante tres componentes: la fuente, el medio de transmisión y el receptor (Rainer, 1982). Identificar y comprender cada uno de ellas simplifica el examen de su causa y la posterior discusión de las medidas correctivas. La fuente corresponde al contacto de los vehículos con la calzada cuando existen imperfecciones en ella, fuerzas de impacto y fuerza de frenado, lo que genera ondas que se propagan hacia abajo y radialmente (Hajek et al, 2006). Las principales variables que tienen efecto en las amplitudes de vibración son la velocidad del vehículo, su peso y tipo de suspensión, rugosidad de la superficie de rodadura, y la rigidez de la superficie de desgaste y la sub-base. En cuanto al medio de transmisión, las ondas generadas se propagan por el suelo, van atenuándose con la distancia y el amortiguamiento natural del material. Una vez que las ondas alcanzan las fundaciones de las construcciones, pueden amplificarse hasta cinco veces en su propagación hacia las plantas superiores, dependiendo de la naturaleza de la vibración (su frecuencia) y la susceptibilidad a la vibración de los elementos edilicios (vigas, paredes, losas, ventanas, etc.) que se rigen por su frecuencia natural y amortiguación (Mhanna et al., 2012).

Los problemas de las vibraciones inducidas por el tráfico sobre los edificios históricos tienen su origen en características comunes en distintas ciudades del mundo: el deterioro de las calzadas, la concentración de rutas de transporte público en calles adyacentes, etc. (Crispino y D'apuzzo, 2001; Kliukas et al., 2008). Puede preocupar la posibilidad de efectos adversos a largo plazo de vibraciones en este tipo de edificios, especialmente aquellos que se encuentran en una condición débil. Estas vibraciones pueden no representar una amenaza inminente, pero su repetición, su incremento y persistencia en el tiempo pueden contribuir a procesos de deterioro (Clemente y Rinaldis, 1998).

Por lo tanto, la reducción o el aislamiento de vibraciones es una preocupación importante para los ingenieros e investigadores.

Entre los diversos métodos de aislamiento, la instalación de barreras entre la fuente de vibración y las estructuras se considera como una de las mejores soluciones. Entre las diferentes barreras que han demostrado ser efectivas se pueden mencionar las zanjas abiertas, zanjas llenas (Korkmaz et al, 2011), paredes de tablestacas (Massarsch, 2004; Andersen y Augustesen, 2009), o incluso hileras de columnas (Zhifei Shi, 2013; Lu, 2009). Debido a la impedancia entre los diferentes medios y la topografía, con el uso de trincheras, se reduce la amplitud de la vibración superficial que se genera en la base a través de la reflexión, la dispersión y la difracción de la propagación de la onda. Las zanjas abiertas se utilizan a menudo como barreras de ondas; sin embargo, en la práctica, existen limitaciones debido a su inestabilidad. A fin de mantener una zanja abierta a una profundidad considerable, los ingenieros deben utilizar paredes de tablestacas o diafragma a ambos lados de la zanja para proporcionar una estabilidad adecuada y que funcione como una barrera (Tsai y Chang, 2009).

Desde el trabajo desarrollado por Woods en 1968 (Woods, 1968), el empleo de barreras para reducir las vibraciones del suelo han sido ampliamente estudiadas. Se llevaron a cabo varias investigaciones sobre la eficacia de estas barreras, a través de pruebas de campo y simulaciones numéricas empleando el método de los elementos de contorno (MEC), el método de elementos finitos (MEF), y combinación de los dos (MEF-MEC).

A efectos de estudiar la eficacia de las trincheras en la atenuación de las vibraciones del suelo, Woods (1968) llevó a cabo extensivas pruebas a escala de campo. En función de los resultados experimentales, se presentan algunas directrices relativas a las dimensiones de la zanja para lograr una reducción máxima de las vibraciones del suelo. También se llegó a la

conclusión que, debido a que es difícil extrapolar los resultados de las pruebas de campo a escalas reales, las investigaciones numéricas son de mucho interés. Se llevaron a cabo por medio del MEC, estudios numéricos de la eficacia de las barreras para la reducción de vibraciones del terreno, por ejemplo, (Beskos et al, 1986; Dasgupta et al, 1990; Leung et al, 1990; Leung et al, 1991; Al-Hussaini and Ahmad, 1991; Klein et al, 1997; Kattis et al, 1999; Tsai et al, 2008). Otros investigadores emplearon el MEF (Yang and Hung, 1997; Shrivastava and Rao, 2002; Hung et al, 2004; Yang et al, 2004; Wang et al, 2009; Alzawi and El Naggar, 2011; Persson et al, 2016).

Algunas conclusiones generales de las investigaciones numéricas son que las trincheras proporcionan una atenuación de vibraciones más eficaz que las barreras de suelo. Asimismo, la profundidad de la zanja es el parámetro que tiene el mayor efecto sobre la eficiencia, la influencia del ancho podría ser insignificante, mientras que la distancia fuente a la vibración es un factor importante. Otras conclusiones son que la eficacia de las barreras depende de los parámetros materiales del relleno.

Es importante notar que los modelos que emplean herramientas numéricas para predecir el comportamiento de estructuras ante las acciones dinámicas ocasionadas por el tráfico vehicular son escasos o, dependiendo del tipo de estructuras (especialmente mampostería), prácticamente inexistentes. Lo mismo se puede concluir en referencia a los modelos numéricos que permitan establecer sistemas de mitigación, los cuales en general, sólo consideran la influencia de la acción dinámica en el suelo circundante pero no tienen en cuenta de manera directa la acción en las construcciones.

Partiendo de lo expresado anteriormente, de los modelos desarrollados para mampostería y los macro-elementos formulados para materiales compuestos realizados previamente por los autores (Quinteros et al, 2012b; Quinteros et al, 2012a; Nallim et al, 2005; Nallim and Oller, 2008; Kohan et al, 2011; Rango et al, 2013) es posible trabajar con un programa global de elementos finitos que permita abordar el tratamiento de las vibraciones inducidas por el tráfico en edificios históricos y analizar alternativas de atenuación de vibraciones, acordes al lugar de emplazamiento y, en caso de existir, a las normativas correspondientes. Así, en este trabajo se presenta una investigación sobre la influencia de las vibraciones provocadas por el tráfico en edificios históricos con el fin de proponer soluciones de mitigación. Para ello, el punto de partida es la realización de un relevamiento geométrico y mecánico de la estructura en evaluación, así como de las construcciones circundantes (Quinteros et al, 2016). Con estos datos se ha definido la acción dinámica proveniente del tráfico teniendo en cuenta las particularidades que éste origina, a través de impulsos que definen los estados de carga que se aplican a este programa. También se modela la estructura principal, así como el suelo y edificios aledaños. De esta manera, se logra tener resultados orientativos del conjunto incluyendo sus condiciones de contorno. Finalmente, se analizan diferentes alternativas de mitigación de vibraciones con un doble objetivo. El primero es validar el empleo de la herramienta numérica basada en un código de elementos finitos explícito, así como la metodología global planteada. El segundo objetivo es proponer opciones para la mitigación empleando distintas variantes de atenuación de las vibraciones, incluyendo estudios paramétricos considerando variaciones en las características geométricas y mecánicas de los dispositivos de atenuación.

## 2 CONSTRUCCIÓN ANALIZADA

Para este estudio se ha elegido la torre campanario de la Basílica Menor y Convento de San Francisco de la ciudad de Salta (Argentina), que por su importancia, integra el corredor histórico más importante de la ciudad. Fue declarada Monumento Histórico Nacional en

1941. La torre campanario, realizada en cuatro cuerpos superpuestos que se aligeran hacia arriba y culminan en un remate, tiene una altura aproximada de 52 m y es considerada como una de las más altas de Hispanoamérica como cuerpo aislado (Figura 1).



Figura 1: Vista satelital y vistas del Campanario de la Basílica de San Francisco

Los resultados obtenidos con el modelo numérico han sido verificados con mediciones experimentales de vibración ambiental (Quinteros et al, 2016). Los resultados mencionados son respuestas dinámicas temporales y frecuenciales, en desplazamientos y aceleraciones, en distintos niveles del edificio y diferentes puntos del medio circundante. Asimismo, se han procesado tanto los resultados experimentales, como los numéricos para obtener los valores en decibelios. La modelación numérica llevada a cabo implica un estudio de desarrollo e investigación sobre la valoración numérica de la transmisión de vibraciones desde una fuente hasta diversos puntos situados en el edificio seleccionado para el análisis. Para ello se realizó una simulación numérica basada en un modelo de elementos finitos tridimensionales que incluye el edificio y el entorno que lo rodea (terreno y otros edificios), siendo perfectamente capaz de capturar las características dinámicas del conjunto, con sus condiciones de contorno. El modelo ha sido solicitado por la acción dinámica que genera el tráfico en la intersección de las esquinas donde éste se emplaza.

En la Sección 3 del presente trabajo se hace una descripción de las características del modelo global de elementos finitos incluyendo el edificio en estudio, el suelo, la cinta asfáltica, los edificios circundantes y los dispositivos de atenuación. Luego se hace un estudio paramétrico, que permite concluir sobre la eficiencia de estos.

### 3 MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

#### 3.1 Elementos finitos utilizados

En función de la zona que debe discretizarse, la malla utilizada para el cálculo se compone de dos tipos de elementos (Lámina: triangulares y Volumen: hexaedros) (Zienkiewicz & Taylor, 1991). Los elementos de láminas empleados, sin rotaciones, permiten el ensamblaje con los elementos sólidos (Flores & Oñate, 2007). Los elementos de lámina se utilizan en los edificios circundantes, en sus paredes y losa, las losas de la torre en estudio y en la calzada. Por otro lado, los elementos de volumen se utilizan en el terreno, en los elementos situados en el borde que ejercen una función de absorción de las vibraciones para que estas, cuando lleguen al borde del modelo, no se reflejen nuevamente. La estructura de base y muros de la torre del edificio histórico y la pantalla de atenuación propuesta para la mitigación de las vibraciones también fueron modelados con elementos hexaédricos.

La discretización del dominio total se ha realizado con 61415 elementos, de los cuales 57501 son hexaedros y 3914 son triangulares, con un total de 64408 nodos.

Para el desarrollo del modelo se ha empleado el programa de elementos finitos explícito COMPack (COMPack. Innovative Finite Element Code for non linear analysis of composite structures, 2008).

#### 3.2 La malla de elementos finitos

Para el análisis, en el presente trabajo se modela un sector compuesto por las calzadas de las dos calles perpendiculares que rodean el edificio, el terreno circundante y los edificios contiguos correspondientes a la Basílica menor y convento San Francisco (Figura 1.a). Se ha modelado el terreno homogeneizado en tres capas independientes con distintos valores de módulos elásticos, la calzada pavimentada, la torre, los edificios circundantes mencionados y una pantalla de atenuación; con el objetivo de analizar el comportamiento dinámico de la torre del campanario y evaluar la atenuación de las vibraciones producidas a partir de la acción dinámica producida por el tráfico en dicha torre, mediante la utilización del procedimiento numérico propuesto y validado previamente (Quinteros et al, 2016).

La extensión de terreno considerado en el modelo para el estudio, es un bloque de 119 m en la dirección paralela a la calle Córdoba (ver Figura 1.a), 129 m en la calle perpendicular (Calle Caseros) y de 30 m de profundidad. A estas dimensiones hay que añadir 2 m en cada dirección, que corresponden al material con capacidad dinámica absorbente. En la Figura 2.a se muestra una vista general en 3D del modelo de elementos finitos utilizado. Como se dijo en la sección previa, los edificios circundantes y la calzada se han discretizado utilizando elementos de lámina sin rotación, sublaminados constitutivamente y con capacidad para considerar en el análisis las solicitaciones de flexión, cortante y torsión (Martínez et al, 2010). En la Figura 2.b se muestra la división del terreno en tres capas correspondientes a suelos con distintas propiedades mecánicas. Mientras que en la Figura 2.c se muestra el detalle correspondiente a las dimensiones propuestas de la pantalla de atenuación. La tecnología de elementos utilizada, permite realizar una detallada representación de todas las subestructuras que componen el modelo global (terrenos homogeneizados, edificio con muros de mampostería, calzada, cimentaciones, pantalla, etc.). Toda esta tecnología está contemplada en el programa de elementos finitos explícito ComPack desarrollado por CIMNE y QUANTECH (COMPack. Innovative Finite Element Code for non linear analysis of composite structures, 2008).

### 3.3 Restricciones cinemáticas

Se han restringido los desplazamientos de los nodos pertenecientes al borde exterior de los elementos absorbentes en la dirección perpendicular a la superficie a la que pertenecen.

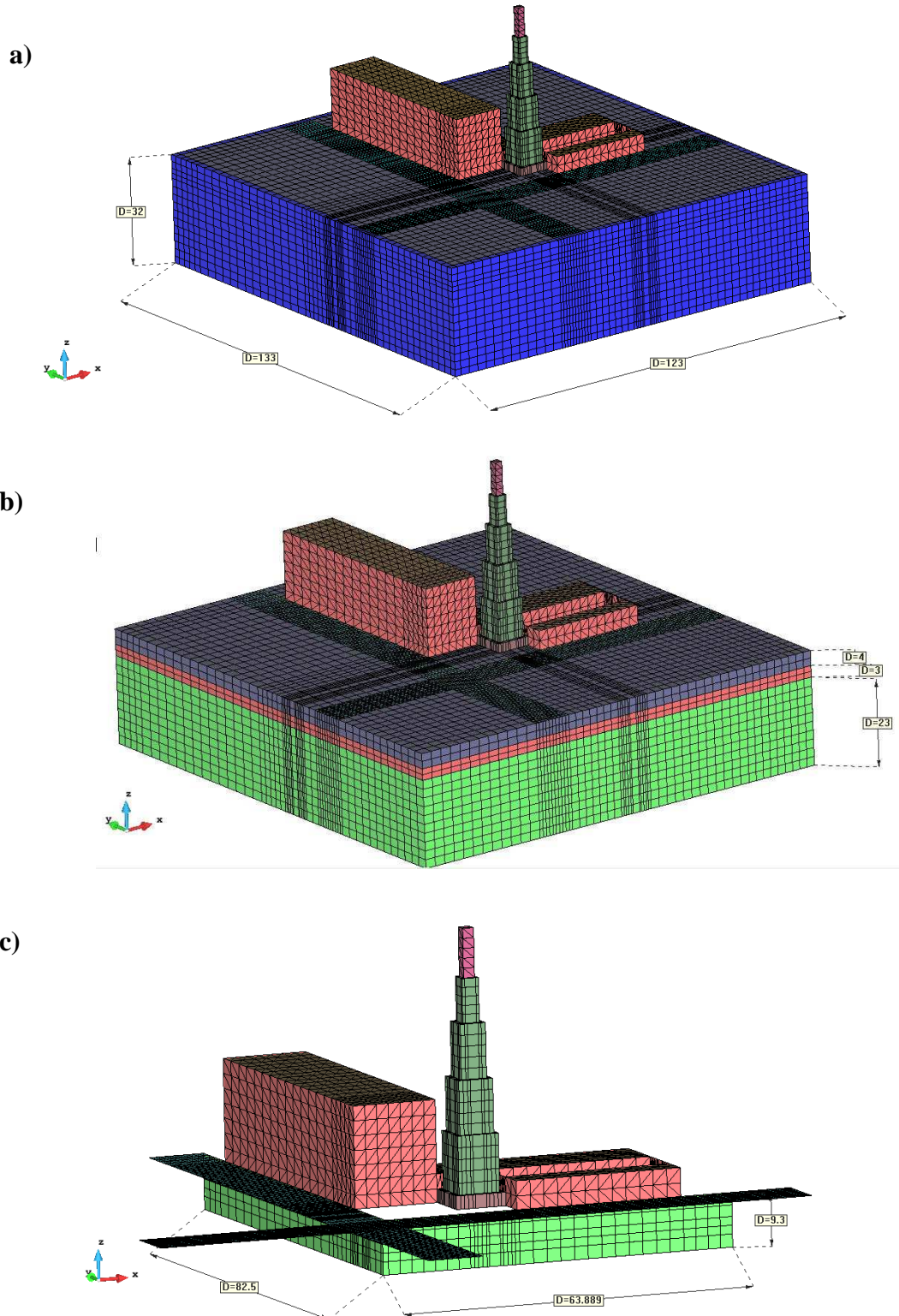


Figura 2. Vista general en 3D del modelo de elementos finitos. 2.a) Modelo General; 2.b) Estratificación del suelo; 2.c) Dimensiones de Pantalla de atenuación



#### 4 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

Las características y propiedades mecánicas de los materiales utilizados en todo el modelo de elementos finitos se detallan en la Tabla 1. Estos materiales resultan de la composición que se realiza con la teoría de Homogeneización (Quinteros et al, 2012b) y las propiedades obtenidas por Toledo et al (2011).

Nombre	Modulo elástico [MPa]	Coefficiente de Poisson	Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	Periodo [s]	Amplitud [%]
Edificio-1-Pared	1200	0.22	1960	1,04	73.015
Edificio-2-Pared	1200	0.22	1960	1,04	73.015
Edificio-1-Losa	30000	0.22	2500	1,04	73.015
Edificio-2-Losa	30000	0.22	2500	1,04	73.015
Campanario Pared	900	0.15	1960	1,04	73.015
Campanario Losa	23900	0.22	2500	1,04	73.015
Calzada	34210	0,22	3200	0.7	73.015
Terreno 1 (espesor 4m)	7	0,35	2500	0.68	13.86
Terreno 2 (espesor 3m)	10	0,35	2500	0.68	13.86
Terreno 3 (espesor 23m)	35	0.35	2500	0.68	13.86
Borde Absorbente	10	0,22	1800	0,479	2,32E-04
Pantalla Opción 1 (Hormigón H21)	21000	0.22	1800	1,04	73.015
Pantalla Opción 2 (SW SR 3508)	0.7	0.38	380	-	75

Tabla 1. Características mecánicas de los materiales utilizados en las distintas zonas del modelo

#### 5 ACCIONES PRODUCIDAS POR EL TRÁFICO

Con el fin de analizar la influencia del tránsito sobre la estructura y para proponer alternativas para su mitigación, se definen los estados de cargas debido al paso de los vehículos, los que resultan del impacto de las ruedas en las cámaras de inspección de las bocacalles, badenes y fuerzas de frenado. La zona de estudio coincide con el recorrido de varias líneas de colectivos urbanos que circulan por una de las calles de la intersección (Calle Córdoba). Existe un semáforo en la mencionada esquina, y al ser las calles de mano única, implica que el sentido de los estados de carga coincide con el sentido de circulación y no se superponen. A efectos de definir los estados de carga que serán aplicados al modelo presentado se muestran en la vista en planta de la Figura 3 las irregularidades consideradas situadas en la intersección de las calles perpendiculares, siendo un total de seis (6), dos badenes en cada sentido de circulación y dos cámaras de inspección. Los resultados para el estudio en el periodo analizado (15 segundos), se han propuesto para una velocidad de circulación de 30 km/h, lo que determina los pulsos unitarios para la aplicación de las cargas en el tiempo mostrados en la Figura 4. Se considera como intensidad de las cargas los valores correspondientes a los pesos de los vehículos (aproximadamente 11 tn para un colectivo urbano lleno y 1,5 tn para un automóvil). Los impulsos están aplicados en la dirección vertical, perpendicular al sentido de avance de los vehículos para simular impactos, y horizontal, opuesto al sentido de avance para simular fuerzas de frenado. Con ello se obtienen las acciones ocasionadas por el tránsito que actúan en los puntos mencionados.

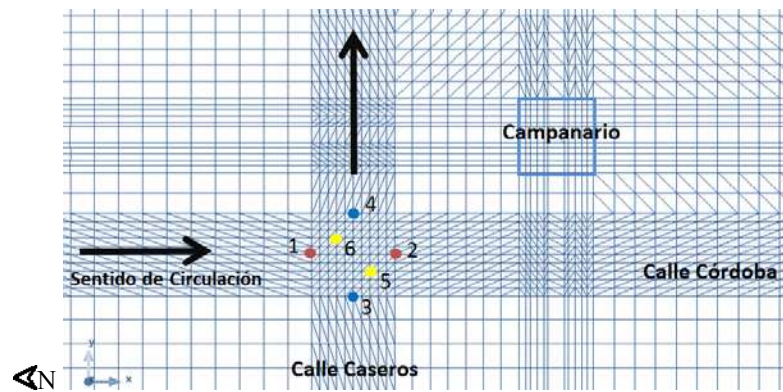


Figura 3. Ubicación de puntos de aplicación de cargas. 1.2. Badenes en sentido de circulación norte-sur. 3.4. Badenes en sentido de circulación oeste-este. 5.6. Cámaras de inspección

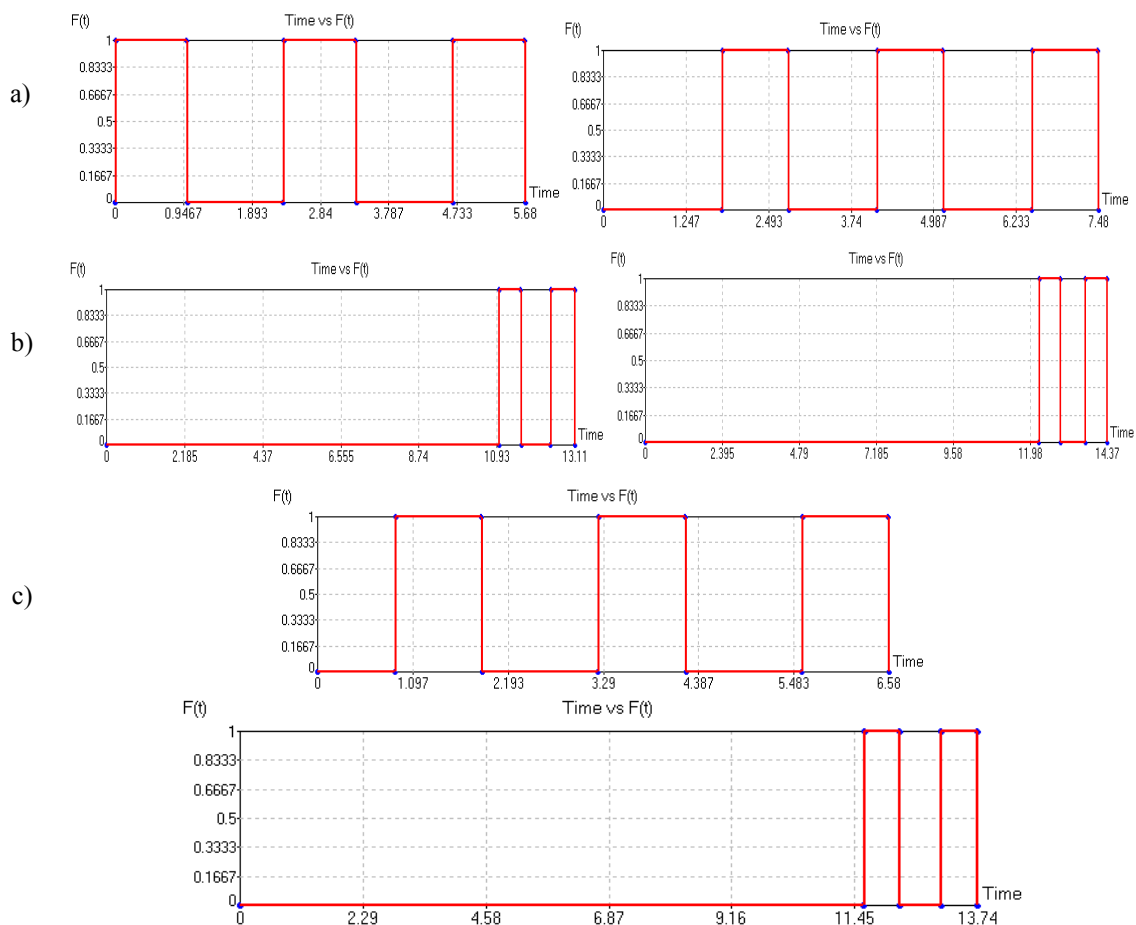


Figura 4. Pulsos para cargas correspondientes a los puntos: a) 1 y 2, b) 3 y 4, c) 5 y 6 (de la figura anterior) respectivamente

## 6 MITIGACIÓN MEDIANTE EL USO DE PANTALLAS

Como se detalló en la Apartado 2, en el presente trabajo se propone como alternativa de solución para la mitigación de las vibraciones producidas por el tránsito, el uso de una pantalla de atenuación y se mostrará el análisis numérico de su influencia. Para llevar adelante este estudio, se propone la colocación de una pantalla de atenuación ubicada sobre el



perímetro de la calzada en las dos direcciones de la circulación vehicular. La simulación permite el análisis de una pantalla de atenuación de distintos materiales con las más variadas propiedades mecánicas, con el objetivo de analizar la incidencia de las mismas y poder definir la solución más apropiada en función de la economía, practicidad de la construcción de acuerdo al lugar de emplazamiento y disponibilidad in-situ. Las dimensiones y ubicación de la pantalla se muestran en la Figura 2.c y las propiedades de los materiales utilizados en la Tabla 1. El espesor de la pantalla y, especialmente, la profundidad no resultan de un análisis trivial. Se propone un espesor de como mínimo entre 50 y 60 cm, lo que resulta apropiado para su colocación y manejabilidad por parte de los operarios. Mientras que para la profundidad de la misma se realizó un análisis de la incidencia de las vibraciones en un perfil vertical de suelo a través de la comparación de los acelerogramas obtenidos numéricamente en puntos ubicados sobre el nivel de calzada y a 2m, 5.5m, 9m, 16.2m y 21 m de profundidad. Los resultados se muestran en la Figura 5 y lo observado justifica la elección de una pantalla con la profundidad elegida ya que más allá de los 9.0 m de profundidad la incidencia de las vibraciones en la superficie resultan imperceptibles o despreciables frente a los valores más cercanos al nivel del terreno.

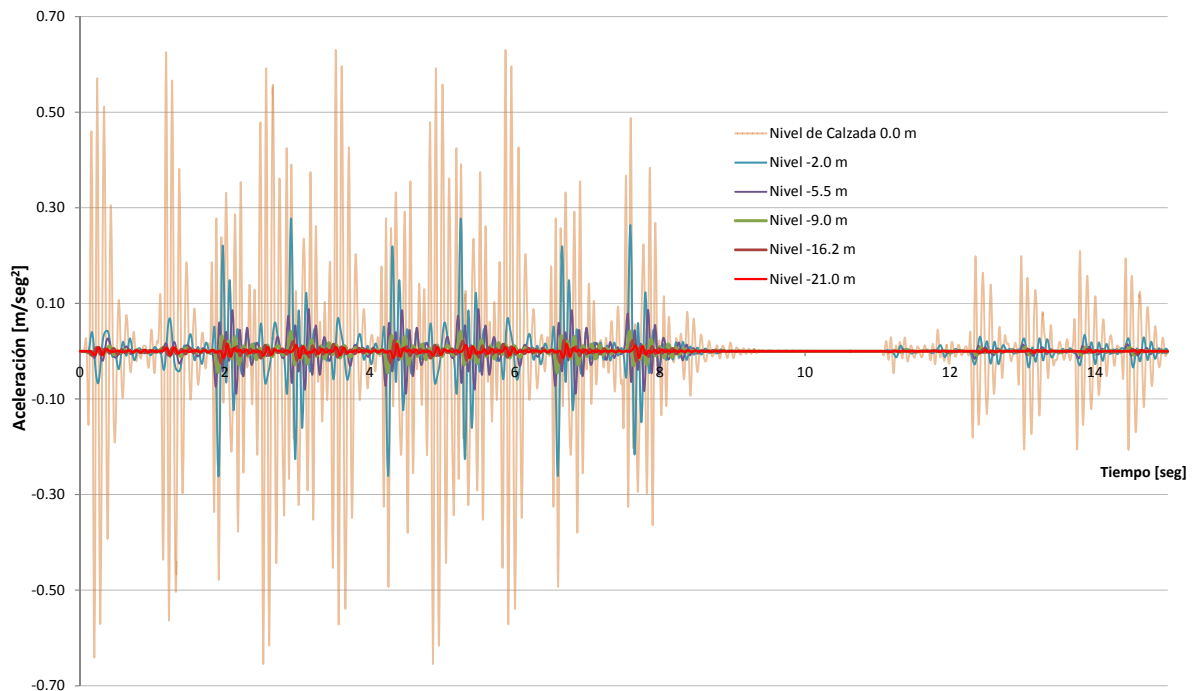


Figura 5. Acelerogramas obtenidos para distintos niveles de profundidad del suelo

Como materiales elegidos para las simulaciones se utilizaron un hormigón con características mecánicas correspondientes a una calidad H21 y un elastómero comercial denominado *Sylomer SW SR 3508* destinado a la aislación de vibraciones y ruidos propagados por estructuras sólidas por sus características y adaptabilidad de su formato; las propiedades mecánicas de los mismos se detallan en la Tabla 1.

## 7 RESULTADOS

El modelo numérico fue validado mediante la comparación de los resultados obtenidos a través de la simulación numérica del fenómeno con los obtenidos mediante mediciones experimentales (Kohan y Gea, 2011) en un trabajo previo presentado por los autores

(Quinteros et al, 2016). Los puntos de comparación utilizados son aquellos correspondientes a las mediciones experimentales en los niveles +39.34 m (último punto accesible), +33.10 m (segunda campana), +23.86 m (primera campana), +17.84 m (nivel descanso) y +0.00 m (Nivel de terreno) (ver Figura 1.b).

## 7.1 Respuestas Frecuenciales y Decibelios

En el modelado de vibraciones inducidas por el tránsito en edificios, resulta indispensable verificar que los niveles de vibración obtenidos no excedan los valores tolerables, de acuerdo con normativas vigentes, y con los protocolos y procedimientos de medida establecidos. Para ello es necesaria la utilización de una herramienta complementaria para analizar las intensidades de vibración en los puntos objeto de estudio. Existen varias normas nacionales e internacionales que ofrecen criterios para la exposición del ser humano y edificaciones a las vibraciones, tales como la Norma Internacional ISO 2631 (Parte 1 y 2) y su versión adoptada en nuestro país, la norma IRAM 4078, el Instituto de Normalización Alemana DIN define límites admisibles de vibraciones para edificios en la reglamentación DIN 4150, la normativa Suiza SN 640312, el Real Decreto 1367/2007, entre otras. Con este propósito se ha desarrollado un programa de cálculo y se describen a continuación los principales conceptos y técnicas implementadas relacionadas con la evaluación de los niveles de vibración.

El Real Decreto 1367/2007 establece los límites tolerables medidos en decibelios para las distintas edificaciones y define un índice de vibración  $L_{aw}$  que, en decibelios resulta:

$$L_{aw} = 20 \log \frac{a_w}{a_0} \quad (1)$$

donde  $a_w$  medida en  $m/s^2$  se define como máximo valor eficaz (RMS) de la señal de aceleración con ponderación en frecuencia y  $a_0$  es una aceleración de referencia con un valor de  $10^{-6} m/s^2$ .

La norma ISO 2631 define los requerimientos generales para la medida y análisis de vibraciones mecánicas y de choques, y para la evaluación de la exposición humana a las mismas. Establece procedimientos de medida de vibraciones y evaluación de sus niveles. La normativa establece diferentes métodos de evaluación y sus condiciones de aplicabilidad. El método implementado se conoce como “running r.m.s” y consiste en un método numérico para la obtención del índice de vibración y es el más apropiado para señales simuladas. Este método considera la presencia de choques o vibraciones transitorias usando la integración en pequeñas ventanas temporales. La magnitud de vibración se define como el valor máximo de la vibración transitoria (maximum transient vibration value MTVV) dado como el valor máximo en el tiempo de  $a_w(t_0)$  definido como:

$$a_w(t_0) = \sqrt{\left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [a_w(t)]^2 dt \right\}} \quad (2)$$

donde  $a_w(t_0)$  es la aceleración instantánea con ponderación de frecuencia;  $\tau$  es el intervalo de integración para realizar el promedio, es decir la longitud de la ventana;  $t$  es la variable de integración y  $t_0$  es el instante de tiempo de observación o tiempo instantáneo.

El valor de la máxima vibración transitoria se define como la magnitud más alta de  $a_w(t_0)$  leída durante el periodo de la medición o en este caso de las calculadas:

$$MTVV = \max[a_w(t_0)] \quad (3)$$

La forma en que las vibraciones afectan a las personas depende de su contenido frecuencial. La Norma ISO 2631 establece la función de ponderación de frecuencia para vibraciones en el interior de edificaciones. El dato de entrada es la historia temporal de la aceleración. Esta historia temporal es filtrada mediante los filtros adecuados y se obtienen las respuestas en amplitud de estos filtros en el dominio de la frecuencia. En la Figura 6 se muestra los valores MTVV con ponderación de frecuencia en Decibelios (dB), para las frecuencias entre 1 y 125 Hz (frecuencias nominales) para los resultados obtenidos de manera numérica e in-situ a nivel de terreno y en el punto de medición más alto del campanario respectivamente (Quinteros et al, 2016).

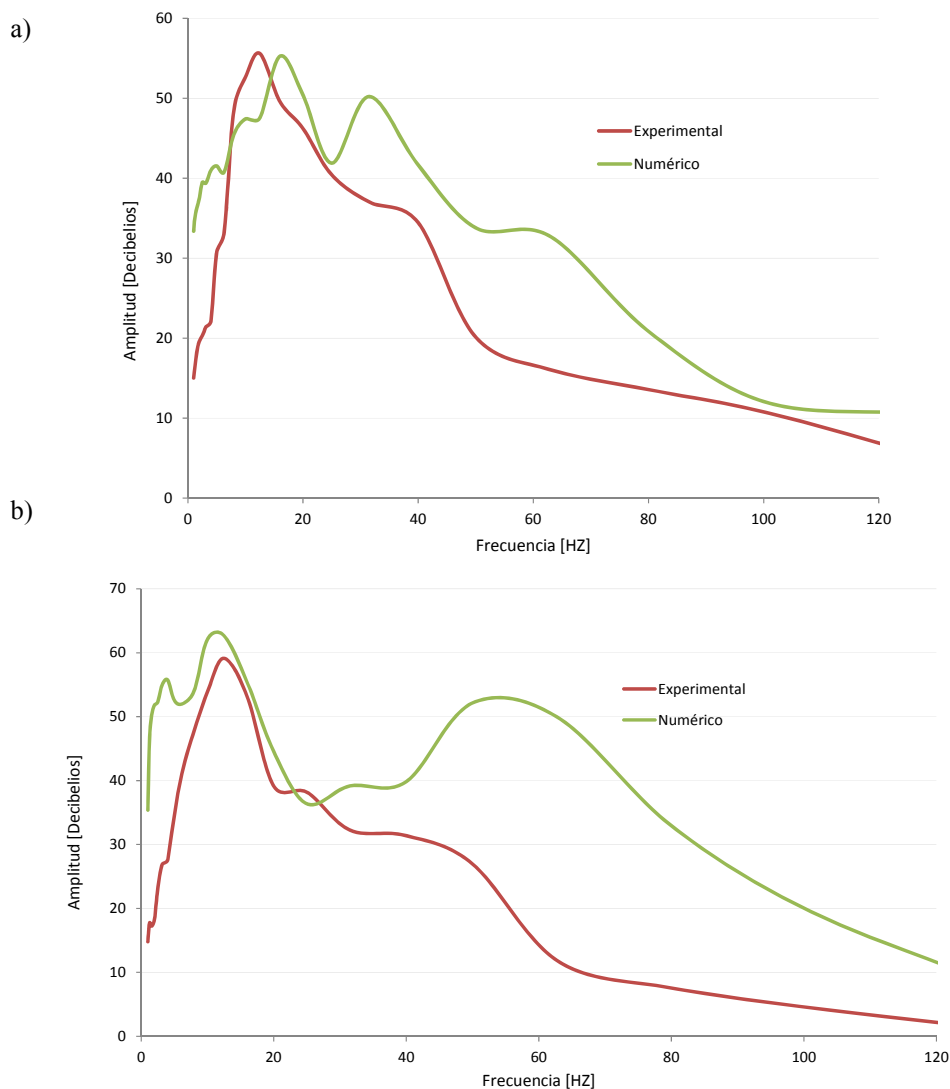


Figura 6. Comparación de aceleraciones MTVV con ponderación de frecuencia en Decibelios (dB) correspondiente a la medición: a) nivel de terreno y b) nivel más alto

Con la metodología validada mediante la comparación de resultados numéricos con resultados experimentales se procedió a realizar las simulaciones correspondientes con la consideración de la pantalla de atenuación de dos materiales descritos anteriormente (Hormigón y Elastómero). Se buscaba evaluar si los índices de vibraciones MTVV disminuían, producto de la atenuación que la pantalla le infería a las vibraciones del sistema.

En la Figura 7 se muestran las curvas de comparación entre los resultados obtenidos a nivel del terreno in situ y aquellos mediante la simulación numérica para los dos casos detallados. Mientras que en la Figura 8, se hace lo propio pero se muestran las curvas de comparación correspondiente al nivel de medición más alto en la torre del campanario (+39.34 m).

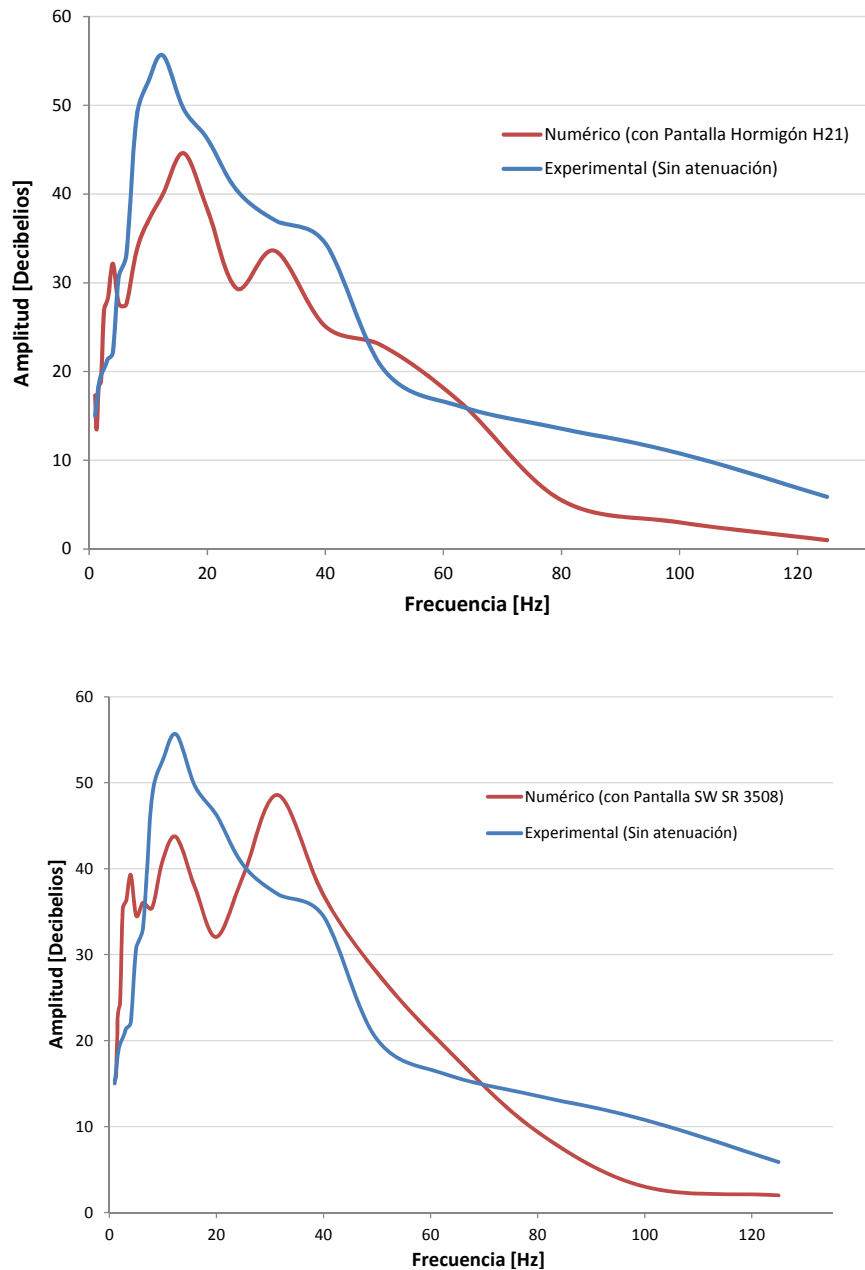


Figura 7. Comparación de aceleraciones MTVV con ponderación de frecuencia en Decibelios (dB) correspondiente a la medición a nivel de terreno

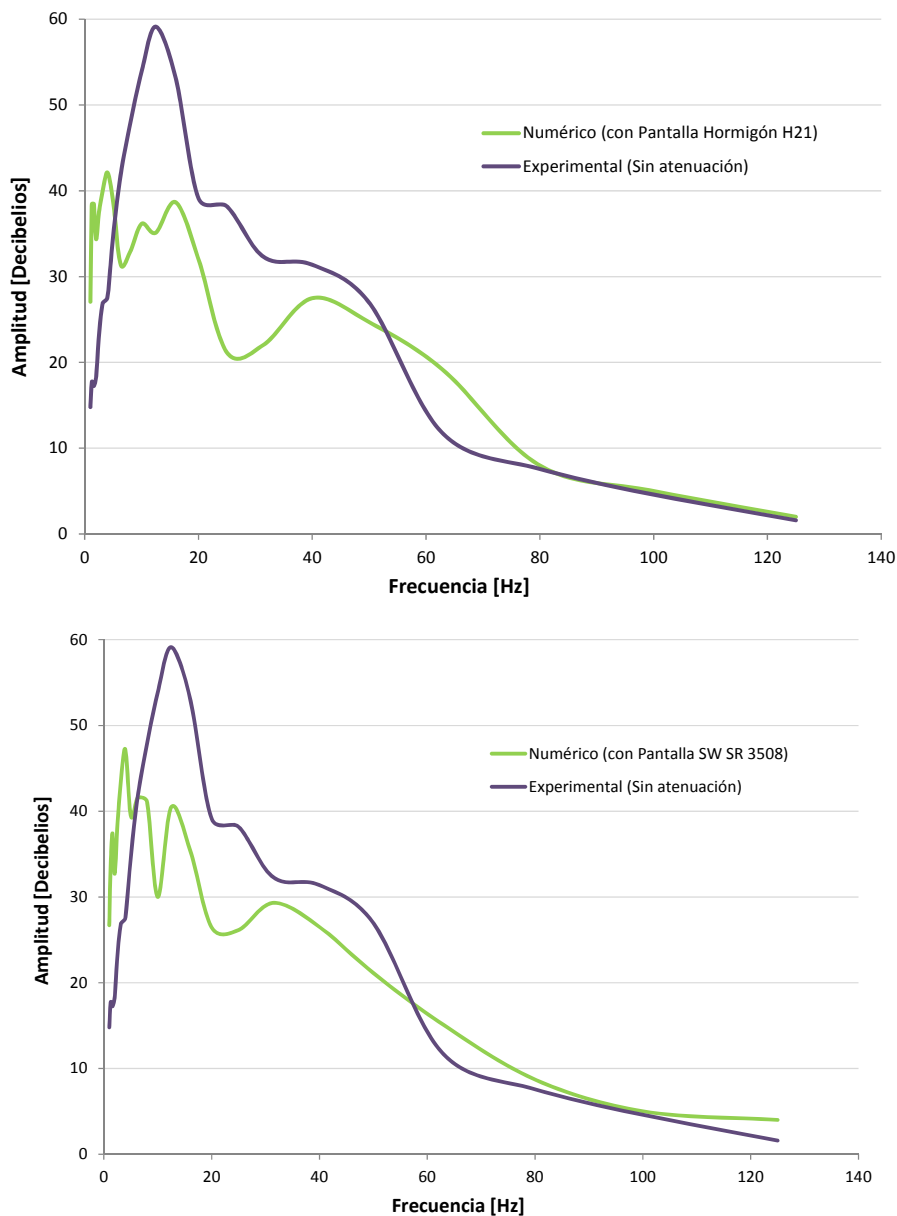


Figura 8. Comparación de aceleraciones MTVV con ponderación de frecuencia en Decibelios (dB) correspondiente a la medición en el nivel más alto

En la Tabla 2 se resumen los valores de los picos máximos en decibelios obtenidos para los casos descritos, destacando en cada uno el porcentaje de atenuación producto de la presencia de la pantalla en cuestión. Se observa en cada caso un porcentaje de disminución considerable, destacándose el efecto que tiene la pantalla de Hormigón por sobre la pantalla con el Elastómero comercial.

	Nivel Máximo de Vibración
<b>A nivel de terreno</b>	[Decibelios]
<i>Sin atenuación (Experimental)</i>	<b>55.61</b>
<i>Sin atenuación (Numérico)</i>	<b>55.28</b>
Con Pantalla de Hormigón H21 (Numérico)	<b>44.61</b>
<b>Porcentaje de atenuación [%]</b>	19.78
Con Pantalla de Elastómero (Numérico)	<b>48.56</b>
<b>Porcentaje de atenuación [%]</b>	12.68
<b>En el nivel más alto del campanario</b>	
<i>Sin atenuación (Experimental)</i>	<b>59.13</b>
<i>Sin atenuación (Numérico)</i>	<b>62.21</b>
Con Pantalla de Hormigón H21 (Numérico)	<b>42.11</b>
<b>Porcentaje de atenuación [%]</b>	28.78
Con Pantalla de Elastómero (Numérico)	<b>47.17</b>
<b>Porcentaje de atenuación [%]</b>	20.23

Tabla 2. Valores de comparación de Niveles máximos de vibración en Decibelios

## 8 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la aplicación de un procedimiento numérico general previamente validado que permite evaluar las vibraciones inducidas por el tráfico en estructuras. Para el análisis de las simulaciones numéricas efectuadas se ha tomado la torre del Campanario de la Iglesia San Francisco, de la ciudad de Salta, un edificio histórico de valor patrimonial. El modelo global de elementos finitos que se ha desarrollado describe razonablemente la estructura analizada junto con sus cimentaciones, el terreno circundante y la calzada. Asimismo, la simulación propuesta para la acción dinámica inducida por el tráfico en la torre, describe correctamente la realidad. El modelo, la acción dinámica que simula tráfico y el procedimiento numérico de cálculo de la respuesta, muestra una gran capacidad para analizar las vibraciones dinámicas en todos los puntos del edificio en que se desee, lo cual permite una continuidad de la metodología planteada para modelar diversas alternativas a efectos de mitigar el efecto de las vibraciones generadas, proponiendo las soluciones más convenientes. Para ello, y en una primera instancia se decidió proponer una metodología de atenuación mediante la colocación de una pantalla en el terreno. A través de un análisis de acelerogramas se concluye en una profundidad apropiada para la pantalla y se plantean dos soluciones con dos materiales de distintas características mecánicas y modos de colocación. Se observa de las curvas obtenidas, que ambas soluciones derivan en la disminución de los picos de las aceleraciones producto de las vibraciones medidas en Decibelios, siendo ligeramente más efectiva la pantalla de atenuación con un hormigón de características propias de un H21, resultando una solución apropiada y totalmente factible de llevar a cabo para el lugar en el que se emplaza.

El modelo propuesto permite lograr una mayor precisión en el cálculo de las frecuencias, aceleraciones, así como en los niveles de decibelios, etc., solo con más nivel de detallado (cerramientos, aberturas, tabiques, etc.) y una discretización más fina, lo cual solo repercutiría en un mayor coste computacional pero resultados más fieles a los reales.

Del análisis de las diversas normativas y criterios para la evaluación de la exposición de las vibraciones, se puede concluir de los resultados obtenidos que la magnitud de dichas vibraciones se encuentran por debajo de los límites de daño potencial edilicio, los valores de



aceleraciones máximas se consideran no molestos y además no se supera el nivel de 75dB establecido por normativas internacionales. Es importante considerar que esta condición varía con el tiempo, por lo que resulta conveniente realizar evaluaciones periódicas que permitan valorar el estado del edificio en estudio. Es por esto que el aporte del presente trabajo se considera valioso ya que representa la validación de una solución viable y apropiada para llevar adelante en el caso de que resultase necesario, permitiendo el análisis de la atenuación en función de los parámetros involucrados (dimensiones y materiales disponibles).

## 9 AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a los integrantes del Aula CIMNE-ESEIAAT, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial y Aeronáutica de Terrassa, en la provincia de Barcelona (España) por el apoyo en la realización de este trabajo, así como al CONICET, a la Facultad de Ingeniería y al CIUNSa de la Universidad Nacional de Salta por financiar esta investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Hussaini TM, Ahmad S. Design of wave barriers for reduction of horizontal ground vibration. *J Geotech Eng (ASCE)* 117(4):616–36, 1991.
- Alzawi A, El Naggar MH. Full scale experimental study on vibration scattering using open and in-filled (GeoFoam) wave barriers. *Soil Dyn Earthq Eng* 31:306–17, 2011.
- Andersen L. and Augustesen A.H. Mitigation of traffic-induced ground vibration by inclined wave barriers - A three-dimensional numerical analysis. *ICSV16*, Kraków, Poland, 2009.
- Beskos DE, Dasgupta G, Vardoulakis IG. Vibration isolation using open or filled trenches Part 1: 2-D homogeneous soil. *Computational Mechanics* 1(1):43–63, 1986.
- Clemente P., Rinaldis D. Protection of a monumental building against traffic-induced vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* Volume 17, Issue 5, Pages 289–296, 1998.
- COMPack. CIMNE and Quantech-ATZ. Innovative Finite Element Code for non linear analysis of composite structures. Explicit finite element. <http://tts.cimne.com/compack/>, 2008.
- Crispino, M., y D'apuzzo, M. Measurement and Prediction of Traffic-Induced Vibrations in a Heritage Building. *Journal of Sound and Vibration* 246(2), 319-335, 2001.
- Dasgupta G, Beskos DE, Vardoulakis IG. Vibration isolation using open or filled trenches Part 2: 3-D homogeneous soil. *Computational Mechanics* 6 (2): 129–142, 1990.
- Flores FG & Oñate E. A rotation-free shell triangle for the analysis of kinked and branching shells. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 69 (7), 1521-1551, 2007.
- Hajek, J. J., Blaney, C. T., y Hein, D. K. Mitigation of Highway Traffic-Induced Vibration. *2006 Annual Conference of the Transportation Association of Canada*, Charlottetown, Prince Eduard Island, 2006.
- Hung HH, Yang YB & Chang DW. Wave Barriers for Reduction of Train-Induced Vibrations in Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130(12), 2004.
- Hung HH, Yang YB, Chang DW. Wave barriers for reduction of train-induced vibrations in soils. *J Geotech Geoenviron Eng (ASCE)* 130(12):1283–91, 2004.
- Kattis SE, Polyzos D, Beskos DE. Modelling of pile wave barriers by effective trenches and their screening effectiveness. *Soil Dyn Earthq Eng* 18 (1):1–10, 1999.
- Klein R, Antes H, Le Houédec D. Efficient 3D modelling of vibration isolation by open trenches. *Comput Struct* 64(1–4):809–17, 1997.

- Kliukas, R., Jaras, A., y Kacianuaskas, R. Investigation of Traffic-Induced Vibration in Vilnius Arch-Cathedral Belfry. *Transport* 23(4), 323-329, 2008.
- Kohan P.H., Nallim L.G., Gea S.B. Dynamic Characterization of beam type structures: analytical, numerical and experimental applications. *Applied Acoustics Journal* Milton Keynes (UK), 72: 975–981, 2011.
- Kohan P. H. y Gea S. B. Efecto de las Vibraciones Producidas por el Tráfico sobre la Torre de Campanario de la Basílica San Francisco. *Memorias del 9º EIPAC11*. Salta, Argentina. 2011.
- Korkmaz K. A., Ay Z., Keskin S.N. and Ceditoglu D. Investigation of Traffic-induced Vibrations on Masonry Buildings in Turkey and Countermeasures. *Journal of Vibration and Control* 17(1) 3–10, 2011.
- Leung KL, Beskos DE, Vardoulakis IG. Vibration isolation using open or filled trenches Part 3: 2-D non-homogeneous soil. *Computational Mechanics* 7 (2): 137–148, 1990.
- Leung KL, Vardoulakis IG, Beskos DE, Tassoulas JL. Vibration isolation by trenches in continuously nonhomogeneous soil by the BEM. *Soil Dyn Earthq Eng* 10(3):172–179, 1991.
- Lu J.F., Xu B., Wang J.H. A numerical model for the isolation of moving-load induced vibrations by pile rows embedded in layered porous media. *International Journal of Solids and Structures* 46: 3771–3781, 2009.
- Martinez X, Rastellini F, Flores F, Oller S, Oñate E. Computationally optimized formulation for the simulation of Composite materials and delamination failures. *Comp. Part B:Eng.* 42,134–144, 2010.
- Massarsch K. R. Mitigation of Traffic-induced Ground Vibrations. *11th International Conference on Soil Dynamics & Earthquake Engineering (ICSDEE) and the 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (ICEGE) Proceedings*. January 7 – 9, Berkeley, California, USA, 2004.
- Mhanna M., Sadek M, Shahrour I. Numerical modeling of traffic-induced ground vibration. *Computers and Geotechnics* 39: 116–123, 2012.
- Nallim, L.G., Oller, S., Grossi, R.O. Statical and dynamical behaviour of thin fibre reinforced composite laminates with different shapes. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 194, 1797-1822, 2005.
- Nallim L.G., Oller, S. An analytical - numerical approach to simulate the dynamic behaviour of arbitrarily laminated composite plate. *Composite Structures Journal* 85(4): 311-325, 2008.
- Persson P., Persson K., Sandberg G. Numerical study of reduction in ground vibrations by using barriers. *Engineering Structures* 115: 18–27, 2016.
- Quinteros, R., Oller, S., Nallim, L. Modelo de elementos finitos para predicción de la influencia de las vibraciones inducidas por el tráfico en estructuras. *V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, “V CAIM 2016”*. Trabajo Completo Aceptado para su publicación, 2016.
- Quinteros, R., Oller, S., Nallim, L. Nonlinear homogenization techniques to solve masonry structures problems. *Composite Structures* 94: 724–730, 2012b.
- Quinteros, R., Oller, S., Nallim, L. Modelo de Degradacion Diferenciada para Materiales Compuestos. *Mecánica Computacional* Vol XXXI, págs. 1591-1606. X Congreso Argentino de Mecánica Computacional (MECOM 2012), 2012a.
- Rainer J.H. Effect of vibrations on Historic Buildings: An Overview. *The Association for Preservation Technology Bulletin* Volume XIV, No. 1, p. 2 -10m, 1982.
- Rango R.F., Nallim L.G., Oller S. Static and dynamic analysis of thick laminated plates using

- enriched macroelements. *Composite Structures* Volume 101, Pages 94–103, 2013.
- Shrivastava RK, Kameswara Rao NSV. Response of soil media due to impulse loads and isolation using trenches. *Soil Dyn Earthq Eng* 22(8):695–702, 2002.
- Toledo M.W., Vargas I., Gea S.B., Nallim L.G. Características dinámicas del campanario de la basílica de San Francisco (Salta). *Memorias del 9° EIPAC11*. Salta, Argentina, 2011.
- Tsai PH, Feng ZY, Jen TL. Three-dimensional analysis of the screening effectiveness of hollow pipe barriers for foundation-induced vertical vibration. *Comput Geotech* 35:489–99. 2008.
- Tsai P.H., Chang T.S. Effects of open trench siding on vibration-screening effectiveness using the two-dimensional boundary element method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 29: 865–873, 2009.
- Wang JG, Sun W, Anand S. Numerical investigation on active isolation of ground shock by soft porous layers. *J Sound Vib* 321:492–509, 2009.
- Woods RD. Screening of surface waves in soil. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* (ASCE) 94(4): 951–980, 1968.
- Yang YB, Hung HH. A parametric study of wave barriers for reduction of train-induced vibrations. *Int J Numer Meth Eng* 40(20):3729–47, 1997.
- Zhifei Shi J.H. Attenuation zones of periodic pile barriers and its application in vibration reduction for plane waves. *Journal of Sound and Vibration* 332: 4423–4439, 2013.
- Zienkiewicz O. & Taylor LR. *The finite element method*, McGraw-Hill, London, England, 1991.