

CARACTERIZACIÓN E IMPACTO DE LAS VIBRACIONES PRODUCIDAS POR AUTOPISTAS URBANAS

Inga. Medina, Manuela; Dr. Ing. Balbi, Mariano
Laboratorio de Dinámica de Estructuras – Facultad de Ingeniería
Universidad de Buenos Aires
mamedina@fi.uba.ar; mabalbi@fi.uba.ar

RESUMEN

El desarrollo de las actividades de una ciudad, como el tráfico carretero y ferroviario, implica la generación y propagación de distintos tipos de vibraciones en el terreno que pueden impactar de manera negativa en las personas y edificaciones. Este trabajo presenta un estudio integral de las vibraciones registradas en las inmediaciones de distintas autopistas de Buenos Aires, evaluando el impacto de la operación de éstas en zonas altamente pobladas. Para esto se realizó una extensa campaña de medición a lo largo de sus trazas diseñada con el objetivo de conocer el nivel de vibración existente en la línea de edificación y desagregar la influencia de distintas fuentes como el subterráneo y el tráfico de las avenidas.

El análisis de las mediciones indicó un riesgo bajo de daños estructurales, pero que pueden generar molestias. Además, se concluyó que la magnitud de las vibraciones generadas por la autopista son del mismo orden, o menores, que las generadas por el subterráneo. Finalmente, y a partir de la construcción de un modelo numérico estructural, se observó que el contenido de frecuencias de las vibraciones de la autopista se concentra en 5Hz, por lo que no se descarta que haya molestias particulares en estructuras cuya frecuencia natural sea cercana a ese valor.

ABSTRACT

The development of the daily routine of a city, such as road and railway traffic, implies the generation and propagation of different types of soil vibrations that can negatively impact the well-being of people and buildings. This work presents a comprehensive study of the vibrations recorded near different highways in Buenos Aires, assessing their impact in extremely populated areas. For this purpose, an extensive measurement campaign was conducted along their routes designed with the aim of known the level of vibration existing in the building line and disaggregating the influence of different source such as subway and avenue traffic.

The analysis of the measurement indicated a low risk of structural damage, but they may cause discomfort. Additionally, it was concluded that the magnitude of the vibration induced by the highway is of the same order, or lower than those generated by the subway. Finally, based on the construction of a structural numerical model, it was observed that the frequency content on the highway vibration is concentrated at 5Hz, so it is not ruled out that there may be discomfort in structures whose natural vibration is close to that value.

Organiza:

INTRODUCCIÓN

Numerosas actividades humanas producen vibraciones que se transmiten por el terreno; éstas son de distinta naturaleza y pueden generar molestias a las personas, interrupción de la operación de instrumentos de precisión, fallas en instalaciones, daño arquitectónico y estructural, especialmente en patrimonio histórico y cultural (Konon & Schuring, 1985). Si bien esta situación no es nueva, ha ido empeorando con el tiempo a medida que las ciudades se vuelven más densas, y hasta el momento, no es considerada de forma significativa a la hora de la evaluación de proyectos urbanísticos, ni en la planificación del uso de suelo urbano.

Para entender esta problemática, es necesario analizar las características de las distintas fuentes urbanas que son capaces de generar vibraciones, así como también el impacto que pueden tener sobre el desarrollo de la vida en la ciudad.

Desde el punto de vista de la caracterización, muchos estudios se han dedicado a modelar analítica, numérica y/o experimentalmente la propagación de ondas en el suelo debido a varias de estas actividades: el tráfico carretero (Hao & Thien, 1998), trenes (Yang, y otros, 2019), subterráneos (Bian, Jin, & Jiang, 2012), actividades de construcción (Grizi, Athanasopoulos-Zekkos, & Woods, 2016), conciertos masivos, entre otros. Algunos estudios fueron incluso realizados en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, como (Balbi, 2012); (Bertero, Lehmann, Mussat, & Vaquero, 2013); (Mussat, Bertero, & Barbieri, 2019).

En cuanto al impacto sobre personas e infraestructura, en la Ciudad de Lisboa se llevó a cabo un estudio para determinar la línea de base de las vibraciones urbanas debido, principalmente, a tráfico pesado (Da Gama, 2002). En Barcelona (Díaz, Ruiz, Sánchez-Pastor, & Romero, 2017) se realizó un estudio de caracterización de distintas fuentes de vibración a partir de las mediciones realizadas por un sismógrafo. Por otro lado, si bien la evaluación del impacto de las vibraciones en las personas y las estructuras ha recibido considerable atención en las últimas décadas, sigue siendo un problema que aún no tiene metodologías ni estándares uniformes en el mundo.

En este contexto, la estimación de los niveles de vibraciones a los que están sometidas diariamente las estructuras y las personas es de vital importancia para la planificación del uso del suelo, protección del patrimonio histórico y la correcta planificación de la infraestructura urbana. Este último caso es de particular interés en una ciudad como Buenos Aires, donde la infraestructura de transporte en general, y las autopistas urbanas en particular, se encuentran inmersas en áreas de alta densidad tanto residencial como comercial.

El objetivo general de este trabajo es evaluar el impacto de la operación de las autopistas en zonas altamente pobladas, en base a las vibraciones producidas, sus características y los principales factores que inciden en su magnitud. En primer lugar, se buscará establecer una línea de base de vibraciones a lo largo de la traza de las autopistas 25 de Mayo y Perito Moreno, y comparar distintos parámetros con los valores límites dados por distintas normativas, tanto en términos de confort como de daño cosmético y estructural. Para esto se diseñó y llevó a cabo una campaña de medición de vibraciones a lo largo de varios meses. En segundo lugar, se desagregará

Organiza:

la influencia del autopista y otras fuentes cercanas, como avenidas y subterráneo, en la magnitud de las vibraciones encontradas. Por último, se analizará como influyen distintos factores de la autopista en las características de las vibraciones.

METODOLOGÍA

La autopista 25 de Mayo y sus continuaciones, AU Perito Moreno y AU Dellepiane, atraviesan una gran cantidad de barrios con múltiples construcciones -de distintas alturas, antigüedad, calidad- y distintos tipos de suelos. Es por esto que resultó necesario diagramar una campaña de medición que cubra de manera representativa toda la traza de estas autopistas.

La campaña consistió en la toma de mediciones en 28 estaciones a lo largo de las trazas de las autopistas AU 25 de Mayo, AU Dellepiane y AU Perito Moreno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Ésta se realizó en dos etapas: la primera se realizó en el mes de enero de 2023 y consistió en 15 mediciones, y en la segunda se realizaron 13 mediciones entre mayo y junio del mismo año. En la Figura 1 se muestra la ubicación de todas las estaciones de medición, diferenciándolas con color amarillo y azul según correspondan a la primera o a la segunda etapa, respectivamente. En el mapa puede observarse que se ha cubierto representativamente toda la traza de las autopistas bajo estudio.

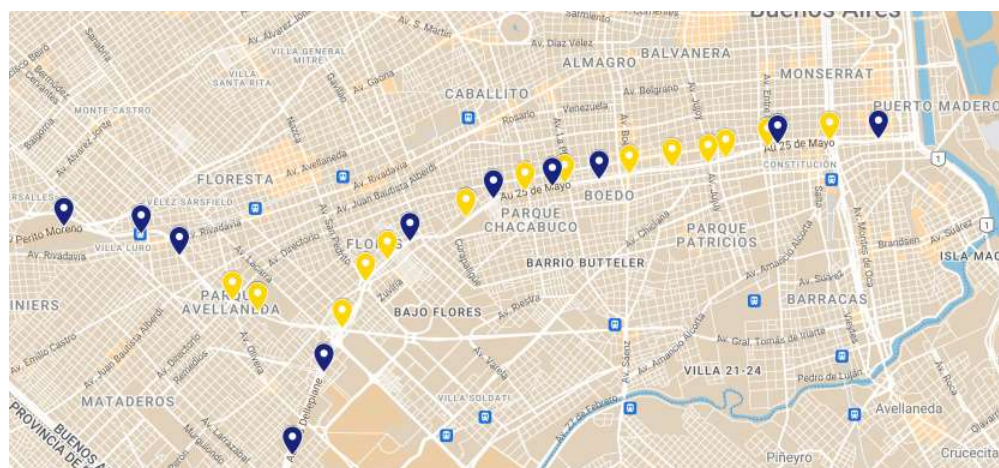


Figura 1: Puntos de Medición

Las mediciones tuvieron una duración de 2 horas en la primera etapa, y de 1 hora y media en la segunda etapa. En las estaciones de medición se dispuso de una red de acelerómetros marca RION de manera perpendicular a la traza de la autopista. Los equipos utilizados pueden verse en la Figura 1.

Los acelerómetros fueron dispuestos en cada estación, teniendo en cuenta los siguientes lineamientos:

- Acelerómetro RION 1: En coincidencia con la pila externa
- Acelerómetro RION 2: Colocado a una distancia intermedia entre el RION 1 y RION 3, excepto en los casos donde en la estación existiera una pila

Organiza:

- perteneciente a una bajada o a una subida a la autopista.
- Acelerómetro RION 3: En coincidencia con la línea de edificación.

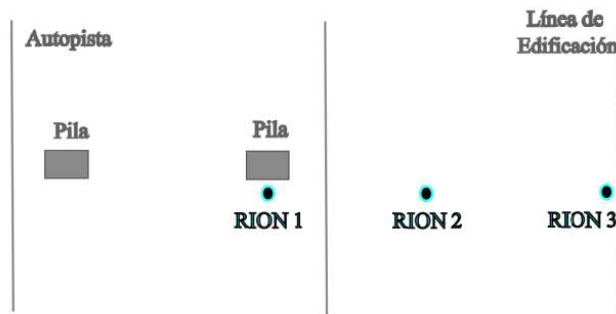


Figura 2: Esquema de ubicación de los RION

Esta disposición, que puede verse en la Figura 2, se estableció con el objetivo de conocer el contenido de vibraciones generadas casi exclusivamente por la autopista (RION 1) y compararlo con lo que llega a la línea de edificación (RION 3) y su importancia relativa a otras fuentes.

NIVEL BASE DE VIBRACIONES

Para realizar la línea de base de vibraciones a lo largo de la traza de las autopistas se utilizaron las mediciones correspondientes al RION 3, que se encontraba, en la mayoría de los casos, a la altura de la línea de edificación ya que ese será el punto de ingreso de las vibraciones a las edificaciones, y luego a las personas. La evaluación de nivel de vibraciones se realizó utilizando las normas IRAM de aplicación en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, que establecen un nivel preferido de vibraciones para evitar problemas de confort en las personas de 0.36 cm/s^2 , y valores máximos de 0.72 cm/s^2 .

Se afectaron los registros con la función de ponderación por frecuencia dada por la Norma IRAM 4078, se obtuvieron los valores de aceleración según el Decreto N°7407/2007 de CABA y se lo comparó con el valor preferido.

En la Figura 3 se observa que los valores de RMS ponderado varían a lo largo de la traza en magnitud, pero siempre manteniéndose por debajo de los valores preferidos establecidos por la normativa de la ciudad.

Luego para el análisis de daño en estructuras debido a vibraciones se utilizó como indicador a la Velocidad Pico de Partícula y se comparó con los valores dados por la Norma IRAM 4077 que establece un nivel máximo de 15 mm/s para evitar daños cosméticos en las edificaciones.

En la Figura 4 se muestra el valor de VPP para todas las estaciones consideradas, obteniéndose un valor máximo de VPP de 1.57 mm/s , un valor casi diez veces menor que el máximo dado por la norma para evitar daño cosmético. Estos valores normativos no tienen en cuenta posibles casos de amplificación dinámica por resonancia. Por lo tanto, se puede concluir que, mientras la frecuencia natural de la estructura esté alejada de las frecuencias excitadas por la autopista, no producirán

Organiza:

daños en las edificaciones -ni cosméticos ni estructurales-.

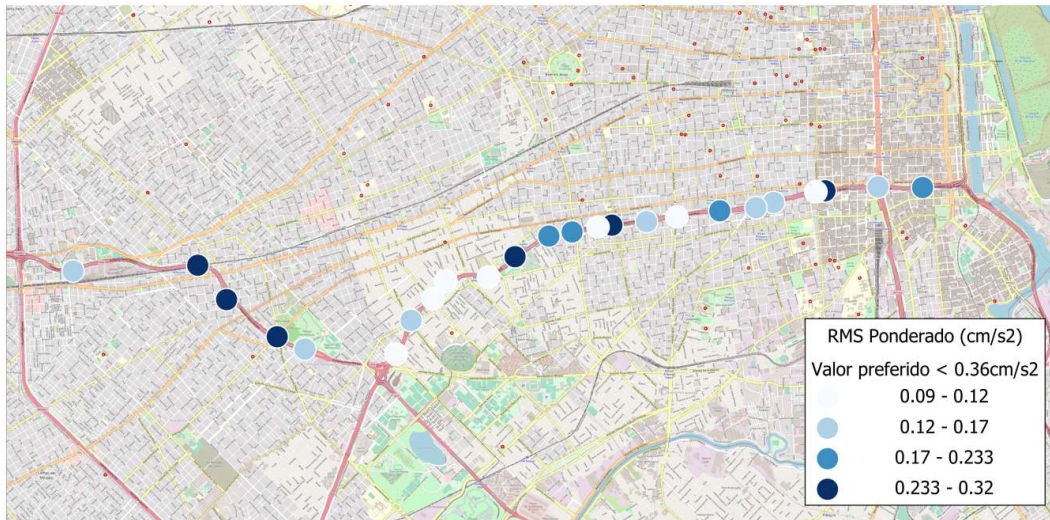


Figura 3: Línea de Base de Vibraciones - RMS Ponderado - Confort

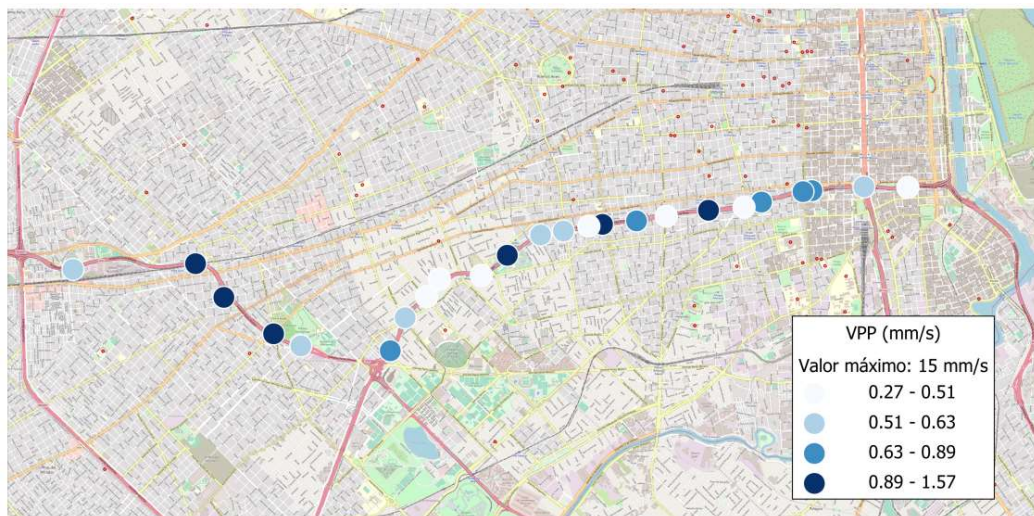


Figura 4: Línea de Base de Vibraciones - VPP- Daño cosmético en estructuras

FUENTES GENERADORAS DE VIBRACIONES

Al realizar mediciones en campo se registran las vibraciones producidas por todas las fuentes presentes, por lo que es importante conocer sus características e identificar qué partes del registro corresponden a cada una de ellas. Además, las vibraciones que llegan al suelo producto del paso de vehículos están influenciadas por las características de los vehículos y de la estructura de la autopista.

Influencia del subterráneo

El paso de trenes y subterráneos genera vibraciones intermitentes en frecuencias por encima de los 40Hz (Balbi, 2012). Estas características se observan fácilmente en el Organiza:

espectrograma típico del paso de subterráneos, que puede consultarse en (Medina, 2023), donde existen líneas verticales en frecuencias altas que coinciden con el paso de las formaciones de la Línea de subte analizada.

Conociendo los atributos típicos de los registros de paso de subterráneos, se analizan las mediciones tomadas sobre la Estación Varela de la Línea E realizada el día 18/01/23. En este tramo la traza del subterráneo coincide con la traza de la autopista 25 de Mayo. Se procesan los datos correspondientes al RION 1 que recibe las vibraciones producto tanto de la autopista como del subterráneo de manera directa. En la Figura 5 se observan líneas verticales en frecuencias altas que son las producidas típicamente por el paso de los subterráneos.

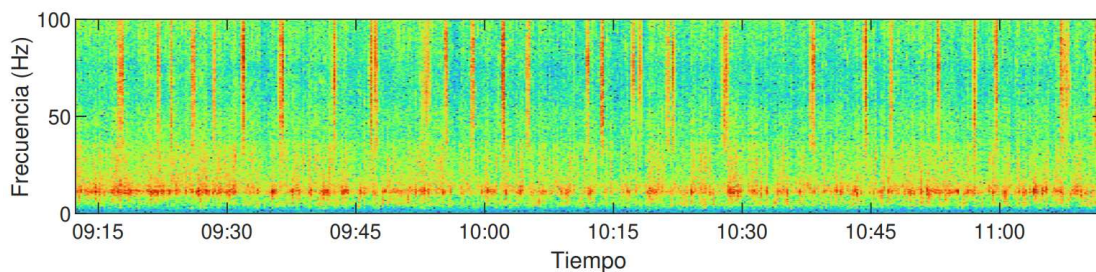


Figura 5: Estación Varela – Espectrograma

Luego, observando el gráfico de la Densidad de potencia espectral del registro (Figura 6a) se ve que el contenido de frecuencia abarca prácticamente todas las frecuencias entre 0 y 100Hz. Para poder analizar que ocurre en las frecuencias altas, se realiza el mismo gráfico, pero para frecuencias mayores a 30Hz (Figura 6b) y se ve que sus características son similares a las típicas por paso de subterráneo.

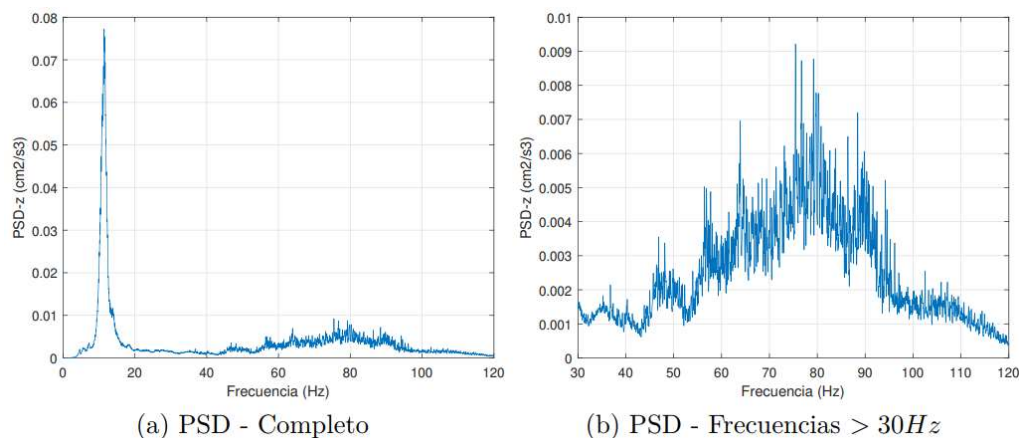


Figura 6 : Densidad de potencia espectral - Estación Varela

En la Figura 6a la cantidad de energía asociada a las frecuencias bajas es mucho mayor que las correspondientes al subterráneo, sin embargo, esto se calculó a partir de la totalidad del registro, es decir, durante las 2 horas que duró la medición donde la excitación del tránsito fue constante en el tiempo y la del subterráneo intermitente.

Organiza:

Es por esto, que se realiza un análisis en intervalos de tiempo menores definidos a partir de aislar los picos del gráfico de aceleración RMS (Figura 7a) y graficar el contenido de frecuencias para determinar si son producto del subterráneo, de la autopista, o de ambos. Se calculó y graficó la aceleración RMS móvil de todo el registro y se identificaron los instantes de mayor intensidad de aceleración, luego se realizó el gráfico de la densidad de potencia espectral en un período de tiempo de 1 minuto centrado en los distintos picos (Figura 7b), se identifica que el rango de frecuencia que mayor cantidad de energía asociada tiene es el correspondiente al paso de subterráneo (contenido de frecuencias mayores a los 40Hz).

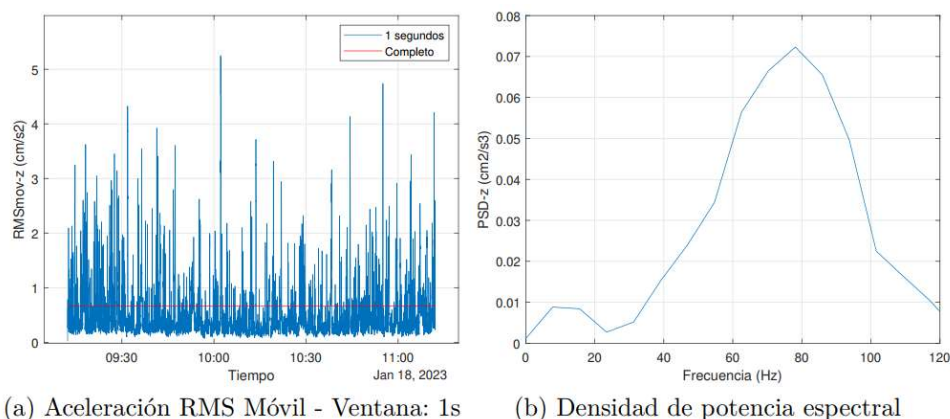


Figura 7: Análisis de picos - Estación Varela

A partir del análisis en distintas estaciones con subterráneos y sin ellos, se concluyó que las vibraciones producto del subterráneo en términos de aceleración RMS son un 26% mayor que las producidas por la autopista. En la Figura 8 puede verse que las estaciones donde existía un efecto directo del subte (Parque Chacabuco y Av. Varela) los valores son mayores a los registrados en las estaciones donde sólo se encontraba la autopista elevada. Se observa también que en la mayoría de los casos el valor de RMS móvil máximo registrado es bastante mayor en el caso donde existe el subte que donde no; en particular la estación Varela, donde el acelerómetro se encontraba por encima de la traza del subterráneo, su valor es ampliamente superior a las producidas por el tráfico de la autopista.

Sin embargo, al aplicar los filtros dados en las normativas para el efecto sobre las personas, el impacto es menor ya que la percepción de las personas (Norma IRAM 4078) es mayor en el intervalo en el que actúa la autopista, siempre que los edificios no amplifiquen las vibraciones. Para el caso de los efectos sobre las estructuras - donde el parámetro de evaluación es la *VPP*, que es independiente de la frecuencia de excitación- el impacto de las vibraciones del subterráneo es de mayor magnitud.

Influencia del tráfico a nivel

Durante la campaña de medición se realizaron dos mediciones sobre la AU Dellepiane (Figura 1) que se encuentra a nivel del terreno. Se analizó la Estación a la altura de Florentino Ameghino. Se procesan los datos y se analiza el espectrograma (Figura

Organiza:

9a) para conocer las características generales del registro. Las líneas horizontales en

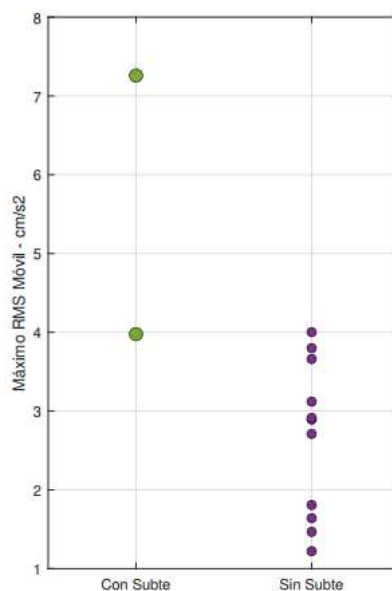


Figura 8 : Comparativa con y sin subte

50 y 100Hz provienen de maquinarias en operación que fueron identificadas durante la medición en campo. Debido a esto, se filtra el registro en el entorno de esas frecuencias para eliminar el ruido de las maquinarias, luego se obtiene el gráfico de densidad de potencia espectral de la señal filtrada (Figura 9b).

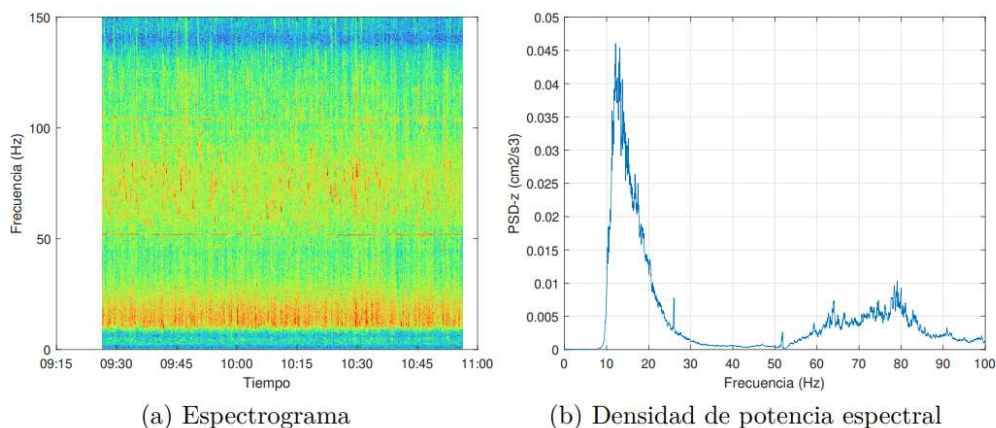


Figura 9 : Estación Ameghino

Luego, en la parte izquierda de la PSD (Figura 9b) se ve un contenido de frecuencias característico del tráfico vehicular y que coincide con el gráfico teórico (Balbi, 2012).

En esta estación, se observa el efecto del tráfico de forma aislada, sin embargo, en algunas estaciones existía tanto el tráfico elevado como el tráfico a nivel producto de las avenidas de gran flujo vehicular. Para analizar esta interacción se eligen cuatro estaciones, dos de ellas – Plaza de los Virreyes y Av. 9 de Julio – con influencia de la

Organiza:

autopista y una avenida; y otras dos – Doblas y Bolívar – alejadas de calles de gran circulación, de la traza del subterráneo y sin juntas. Se procesan los registros y se los filtra entre las frecuencias de 0.25Hz y 40Hz para obtener únicamente la señal producto de la calle y la autopista.

Se realiza el gráfico de densidad de potencia espectral para las cuatro estaciones, presentados en la Figura 10. En las Figura 10a y Figura 10b se ve que el gráfico es muy distinto al característico del tránsito carretero a nivel, tanto en términos teóricos (Balbi, 2012) como de los obtenidos en la Autopista Dellepiane (Figura 9b). Observando los gráficos de las estaciones cerca de calles de bajo flujo vehicular (Figura 10c y Figura 10d) se identifican 3 picos marcados. En cambio, en las otras dos estaciones, estos picos no están tan marcados y las frecuencias intermedias entre ellos tienen más energía asociada.

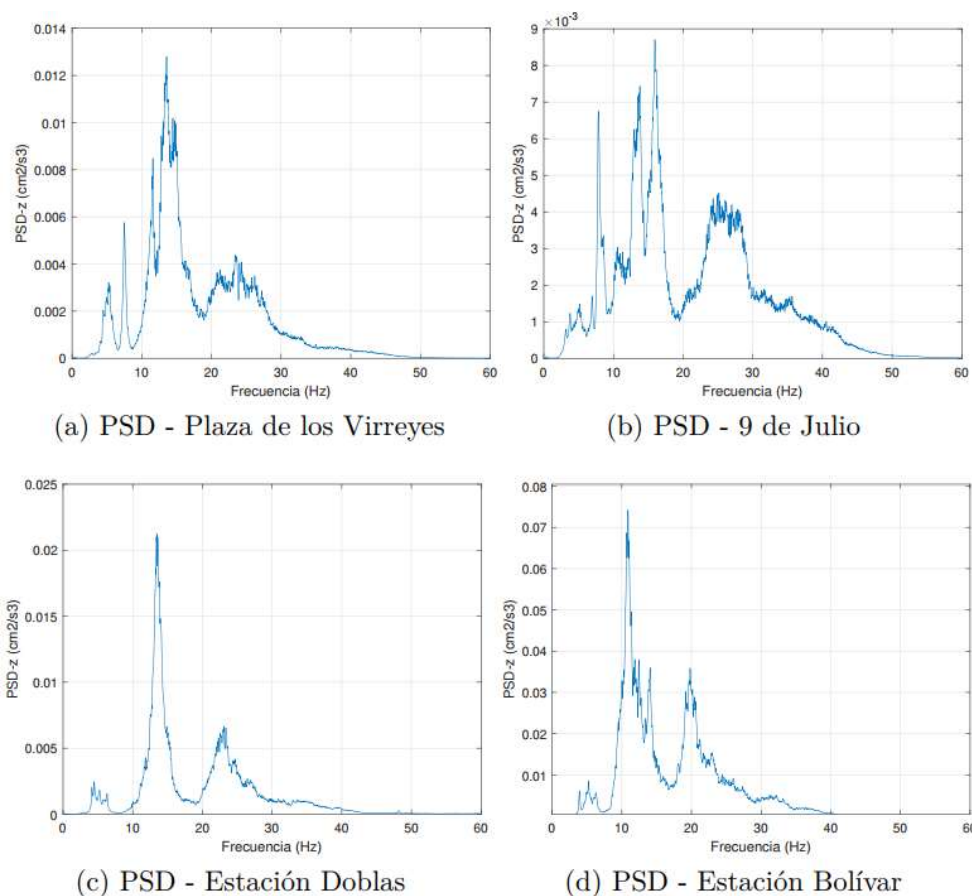


Figura 10 : PSD - Influencia del tráfico vehicular

En términos de la magnitud, cuando se evalúa el RMS en el registro completo los valores son similares, sin embargo, al utilizar RMS móvil las estaciones cercanas a avenidas tienen mayores valores, lo mismo ocurre con la magnitud de la Velocidad pico de partícula (VPP). Además del eje z , se analizan las aceleraciones en los ejes x e y , y allí se ven mayores diferencias en la magnitud, es decir que, mientras la autopista genera vibraciones preponderantemente en el eje vertical z , las avenidas

Organiza:

predominan en los ejes horizontales x e y .

En la Figura 11 se comparan los valores de RMS del registro completo entre las estaciones 9 de Julio, Doblas y Bolívar. Los registros de la primera fueron tomados en el centro de la avenida tomando de manera directa ambas fuentes (avenida y autopista), mientras que las otras dos son en correspondencia con calles de poco flujo vehicular donde las vibraciones son producto, casi únicamente, de la autopista. Además, se observa que, mientras el valor para el eje vertical z es similar para las 3 estaciones, los valores en los ejes horizontales x e y son mucho mayores en la estación 9 de Julio que en las estaciones Doblas y Bolívar.

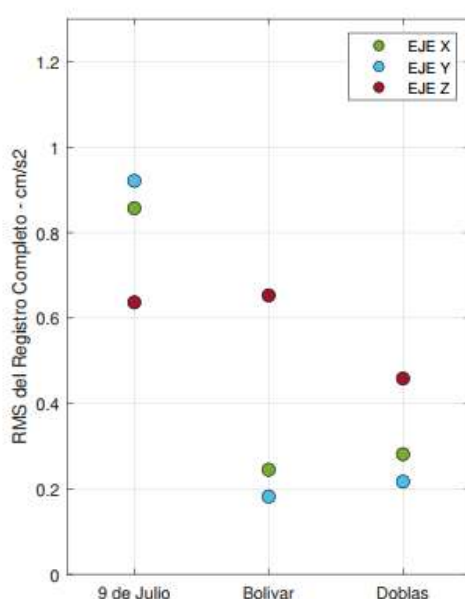


Figura 11 : Efecto de las avenidas en los ejes horizontales

INJERENCIA DE LA ESTRUCTURA DE LA AUTOPISTA ELEVADA EN LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS VIBRACIONES

Las características de las vibraciones producidas por los vehículos en la superficie de rodamiento se espera que sean las típicas del tráfico carretero, sin embargo, la estructura de la autopista elevada transforma las vibraciones y las trasmite al suelo con características distintas a las iniciales, como se observa en el gráfico de densidad de potencia espectral típico encontrado en las mediciones realizadas (Figura 12b). La tipología de la autopista y de los vehículos que circulan sobre ella determinan las características y la magnitud de las vibraciones que se transmiten al suelo. El objetivo de esta sección es describir el impacto en el nivel de vibraciones que tienen las juntas, el tipo de vehículo que circula y la estructura de la autopista elevada en comparación con la autopista a nivel.

Se puede ver que la forma del gráfico ya no es una campana, sino que cuenta con 3 picos marcados alrededor de 5, 10 y 20Hz. La magnitud relativa de estos picos varía

Organiza:

entre los distintos registros, como así también cuando se analiza en períodos de tiempo acotados y no para la totalidad del registro. Al analizar los gráficos de aceleración RMS Móvil (Figura 12a) de los registros se ven picos marcados e intervalos de tiempo donde estos picos son de menor magnitud.

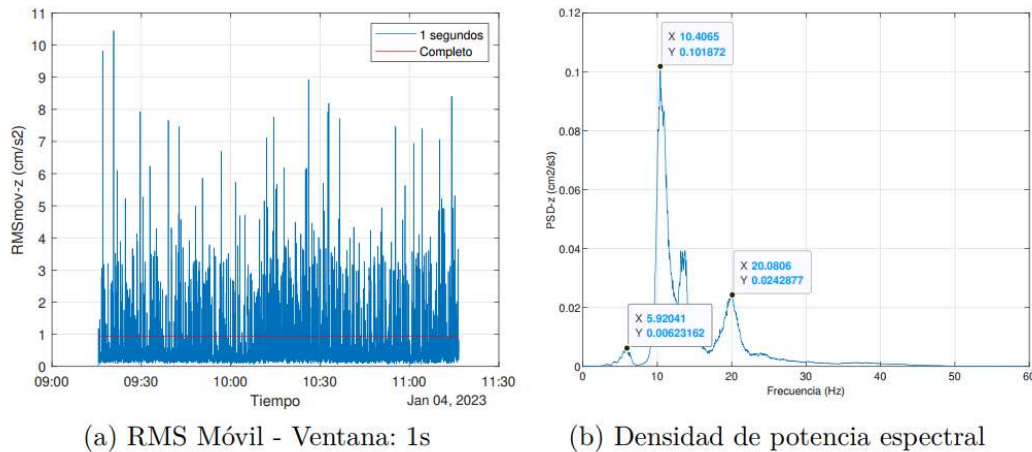


Figura 12 : Gráficos típicos de la autopista elevada

Influencia de las juntas y los camiones

Con el objetivo de ver el efecto que tiene el tipo de vehículo y de las juntas, se analizaron las estaciones cercanas a Av. Entre Ríos y Av. Boedo para observar las diferencias entre los gráficos de aceleración, velocidad y densidad de potencia espectral. Además, se contaba con el soporte del video del tránsito de la autopista al momento de las mediciones. El análisis se realizó identificando picos de aceleración efectiva (*RMS*) en el registro respecto del eje vertical *z* y utilizando los datos registrados en el equipo bajo la pila de la autopista, ya que se ven los efectos de la autopista de forma directa.

Al observar los videos, se constató que para el caso de Entre Ríos (con junta) los picos están directamente vinculados al paso de distintos tipos de camiones, sin existir incidencia del tráfico liviano. En cambio, en el caso de Boedo (sin junta) los picos no pudieron correlacionarse con el paso de ningún vehículo en particular.

De la observación de los gráficos, se concluye en primer lugar, que el paso de camiones por una junta tiene componentes de frecuencias en el entorno de 10, 20 y 5Hz (ordenadas de mayor a menor nivel de energía asociada). Las vibraciones en frecuencias de aproximadamente 10Hz pueden asociarse al paso de camiones, cuya frecuencia fundamental por efecto de la masa no-suspendida se encuentra entre 10 y 15Hz según establecen (Hajek, Blaney, & Hein, 2006). Además, tanto en el gráfico de velocidad (Figura 13b) como en el de aceleración (Figura 13a), se ve un pico concentrado en el centro; y luego, valores de menor magnitud, es decir, asimilable a los efectos de un golpe o impulso.

Organiza:

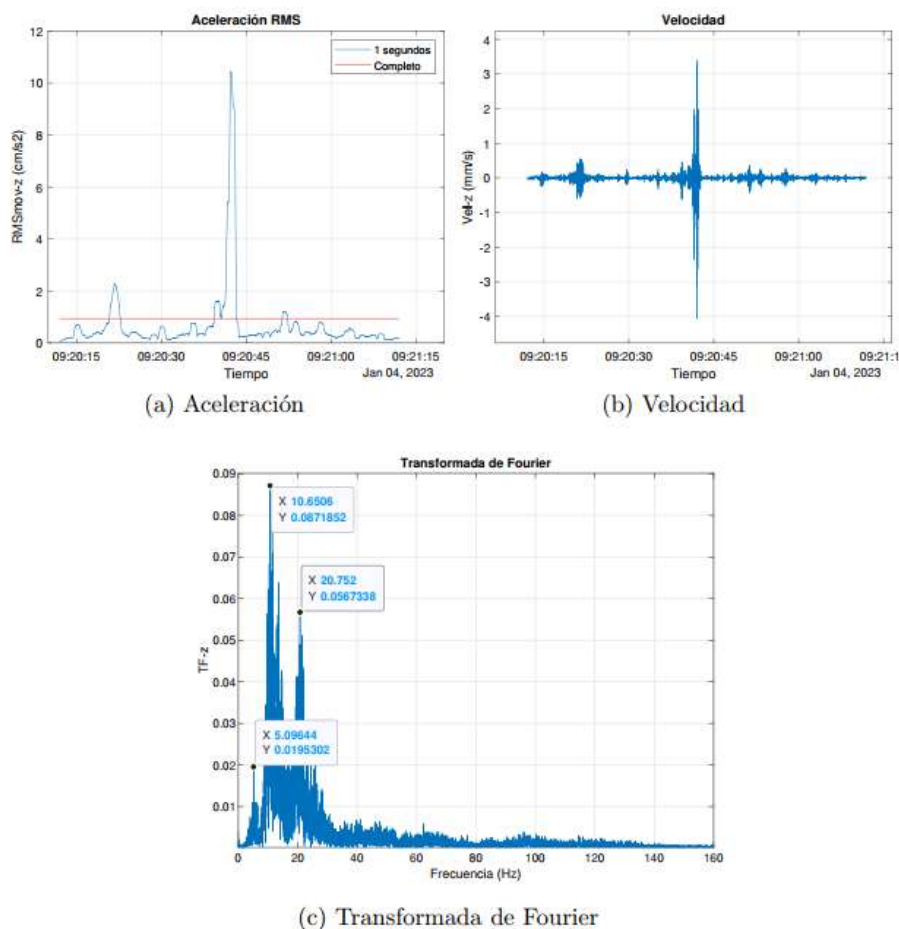


Figura 13 : Estación Av. Varela

En cambio, para la estación Boedo (sin junta), los gráficos de aceleración y velocidad no tienen picos marcados, como puede verse en la Figura 14. En este caso, el registro es mucho más ruidoso y no puede ser considerado como un impulso. Además, en varios de los eventos se observó que el pico máximo de aceleración (Figura 14b) y de velocidad (Figura 14b) se producían en distintos instantes de tiempo. Por último, al analizar la transformada de Fourier (Figura 14c), el contenido de frecuencias es similar al del caso con junta, es decir, concentrado en el intervalo entre 5Hz y 20Hz.

Sin embargo, las magnitudes relativas varían, el pico de 10Hz no está tan marcado y la forma obtenida por encima a los 10Hz se asemeja bastante al tráfico vehicular típico (Figura 4.9b). Al comparar las magnitudes con las obtenidas en la estación con junta, se ven valores de aceleración mucho menores, esto indica que la presencia de juntas tiene un efecto importante en la magnitud de las vibraciones.

Para generalizar estas conclusiones se comparan los valores de RMS Móvil máximo registrado para estaciones con y sin juntas cercanas, 4 para cada caso (Figura 15).

Organiza:

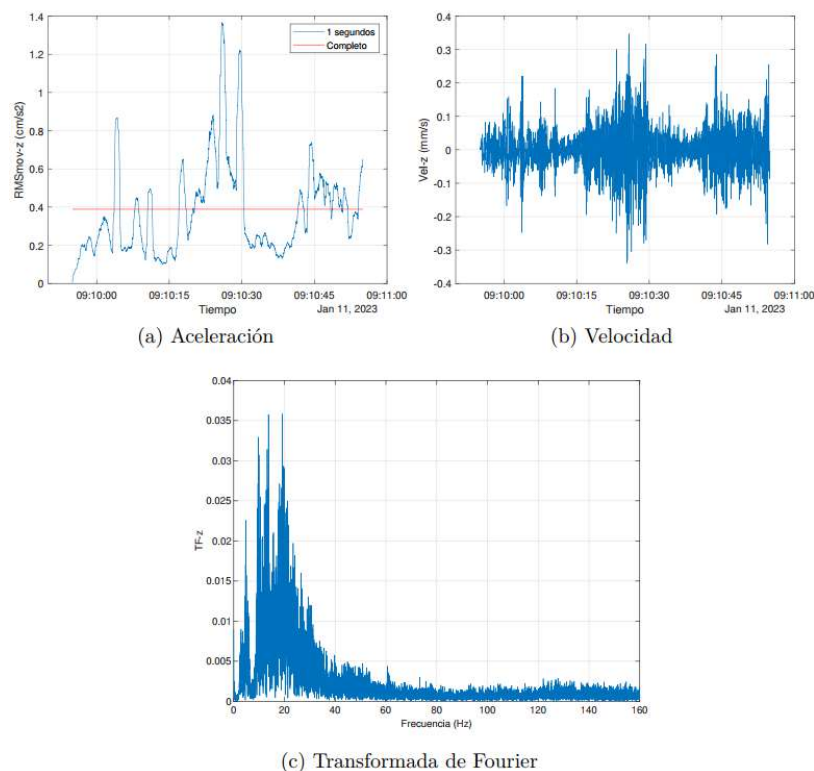


Figura 14 : Estación Boedo

Las estaciones se eligieron teniendo en cuenta que no haya otras fuentes de vibraciones, pudiendo asumir que las diferencias entre éstas van a estar estrictamente relacionadas a la presencia o no de las juntas. Se ve que para el caso sin junta la dispersión en los resultados es menor que para las estaciones con junta; esto se debe a que la magnitud de la vibración de la junta está asociada al mantenimiento de ésta.

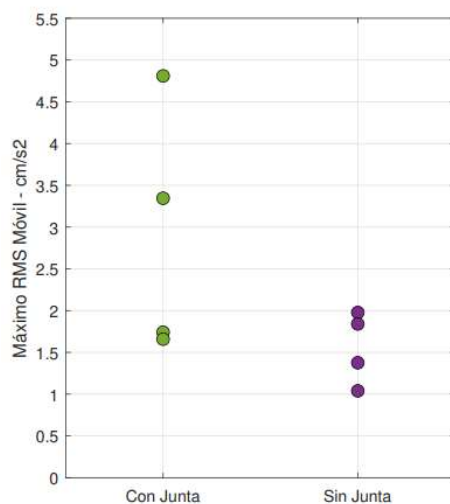


Figura 15 : Estación con y sin junta

Organiza:

Por último, se analizaron intervalos de tiempo con tráfico liviano y se los compararon con los correspondientes a intervalos con tránsito pesado. La diferencia de magnitud de las vibraciones para distintas métricas y para cada uno de los ejes se muestran en la Tabla 1.

Diferencia de magnitud (+ %)	x	y	z	Promedio
RMS Completo	47 %	35 %	62 %	48 %
RMS Móvil 1s	86 %	79 %	83 %	83 %
VDV_{dia}	75 %	44 %	61 %	60 %
VPP	83 %	36 %	63 %	61 %

Tabla 1 : Aumento porcentual de magnitud vehículos pesados vs livianos

Modelo estructural de la autopista

Dado que se observó que existe un contenido de frecuencia cercano a los 5Hz que no es característico del tráfico carretero, se construyó un modelo analítico para compararlo con los resultados de las mediciones realizadas a lo largo de toda la traza de las AU. 25 de Mayo y AU. Perito Moreno. A partir de los planos de la autopista, se realizó un modelo estructural de respuesta dinámica, analizando su respuesta en el dominio de la frecuencia para una carga impulsiva en el voladizo de la estructura.

La autopista se modela como un sistema lineal de material isótropo, elástico lineal y homogéneo. Para la construcción del modelo se analizó el comportamiento estructural de la autopista, tanto en sentido transversal como longitudinal, con el objetivo de obtener un modelo en 2D que sea representativo. El modelo se realiza partiendo de la información provista por el concesionario actual de la autopista (AUSA).

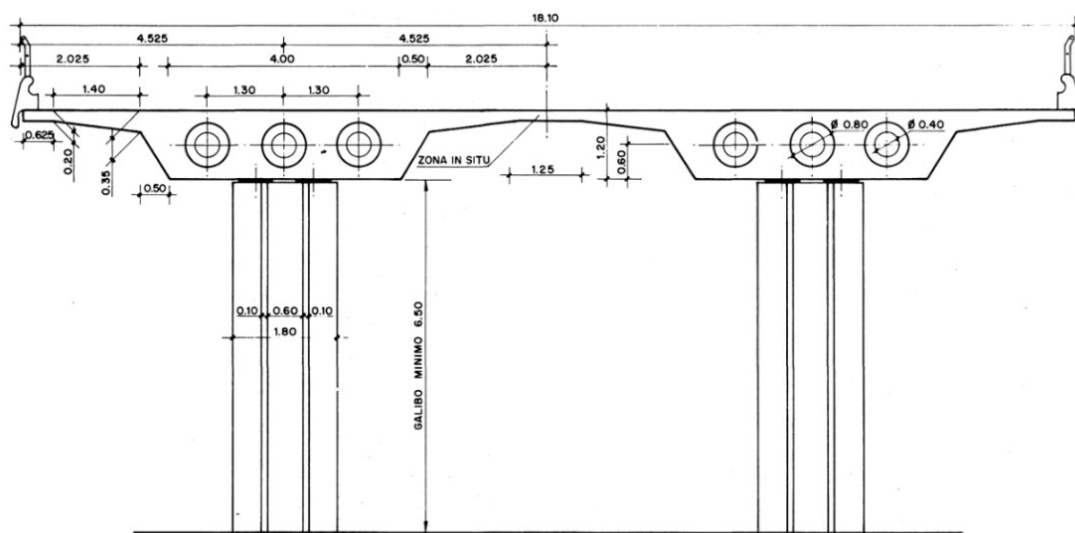


Figura 16: Plano pórtico transversal

Se trata de una estructura compuesta por pilas de hormigón armado tradicional y vigas cajón de hormigón pretensado. La estructura está fundada en pilotes de sección

Organiza:

rectangular a 14m de profundidad. La viga cajón se encuentra aliviada por tres alvéolos circulares como se muestra en la Figura 16.

En el sentido longitudinal, el tablero es una viga continua de 15m de longitud empalmada con el siguiente tramo por una junta. Las juntas se encuentran a $2/9 \cdot L$ - siendo L separación longitudinal de los pórticos transversales - de la pila más cercana. En el empalme, los apoyos son de neopreno-teflón, y los apoyos de las vigas sobre las pilas están materializados con apoyos de neopreno. El modelo de la autopista se planteará en sentido longitudinal, es decir, en la dirección de circulación de los vehículos.

Las características de las vigas y las columnas se detallan en la Tabla 2.

Propiedades	Geométricas		Mecánicas	
	A	J_y	f'_c	f_y
Viga	$1,909 \cdot m^2$	$0,097 \cdot m^4$ y el eje vertical	30MPa	420MPa
Columna	$1,488 \cdot m^2$	$0,068 \cdot m^4$ y el eje débil	21MPa	420MPa

Tabla 2: Propiedades geométricas y mecánicas

El esquema estático (Figura 17) del modelo será un pórtico de 6 columnas espaciadas 25m unidas por una viga continua de 150m, y para los extremos de la viga se considerarán las siguientes condiciones de apoyo:

- El tramo que sobresale una distancia de $2/9 \cdot L$ ($L = 25m$) se considera en voladizo.
- El tramo que sobresale una distancia de $7/9 \cdot L$ ($L = 25m$) se considera un apoyo móvil, materializado por el apoyo de neopreno-teflón apoyado en el siguiente pórtico longitudinal, ya que éste permite los desplazamientos horizontales.

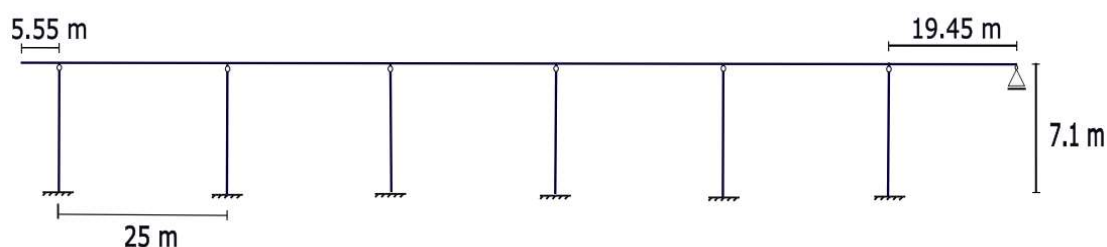


Figura 17: Esquema estático de la autopista

Para determinar las coordenadas dinámicas de análisis, se deben establecer los nodos que tendrán asociadas masas puntuales ideales. El criterio adoptado es colocar una masa en los nudos, en los centros de tramo -tanto de las vigas como de las columnas- y en el voladizo. La asignación de las magnitudes correspondientes a cada una de las masas se realizó a partir de un área de influencia; en sentido transversal se utilizó el peso de la capa de rodamiento y de la viga hasta la mitad del pórtico,

Organiza:

mientras que en el sentido longitudinal se asignó las masas correspondientes a la mitad de la distancia hasta la siguiente masa o apoyo, dependiendo el caso.

Una vez definidas la ubicación y el peso de las masas, se deben definir las coordenadas dinámicas, que corresponden a dos grados de libertad para cada una de las masas (horizontal y vertical), planteado un sistema de 38 grados de libertad dinámicos. A partir de la matriz de masa y de rigidez se obtienen los modos y frecuencias propias de vibración de la estructura. Las primeras cinco frecuencias naturales son:

$$f_n = \begin{bmatrix} 1.2821 \\ 1.3688 \\ 1.5636 \\ 1.8813 \\ 2.2515 \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot Hz \quad (1)$$

Luego se plantea el problema de múltiples grados de libertad con amortiguamiento. Para armar la matriz diagonal de amortiguamiento modal C_n , se utiliza el método de Rayleigh, se definen los ζ_n de cada modo a partir de los valores recomendados en (Chopra, 2007), para este caso el aplicable es $\zeta_n = 3\%$. Dado que las mediciones se analizaron en el dominio de la frecuencia, el problema se resolverá por análisis modal en el dominio de la frecuencia, siendo la solución $U(\omega)$:

$$U(\omega) = \sum_{n=1}^{38} H_n(\omega) \cdot P_n(\omega) \quad (2)$$

Con:

$$H_n(\omega) = \frac{1}{k_n} \cdot \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right] + i \cdot \left[2 \cdot \zeta_n \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]} \quad (3)$$

Siendo $P_n(\omega)$ la transformada de Fourier de la carga en las coordenadas modales.

Se analizará la respuesta dinámica de la reacción vertical de la pila izquierda (Figura 17) debido a una carga impulsiva en el voladizo de la estructura. Para la definición de la carga se utilizó la función *Delta de Dirac*. La carga de la estructura en las coordenadas originales $p(t)$ será 0 en todas las coordenadas excepto en la coordenada correspondiente al grado de libertad vertical en el nodo correspondiente al voladizo. La Transformada de Fourier de esta función es conocida e idénticamente 1. Luego, se multiplica esta carga para obtenerla en las coordenadas modales.

Después de resolver el problema, se obtienen los desplazamientos en todas las coordenadas, sin embargo, solo interesa para este análisis la reacción de vínculo del apoyo más cercano al voladizo, para lo cual se utiliza el esfuerzo axil de la masa más cercana al apoyo ya que, como no existen cargas intermedias, el valor de la reacción del apoyo será igual al esfuerzo de la columna. Para esto se utiliza la fila de la matriz de rigidez condensada en las coordenadas dinámicas que corresponde a la coordenada vertical de la masa. La reacción $R(\omega)$ es una función compleja, por lo

Organiza:

tanto, se toma el módulo.

Una vez obtenida la reacción de vínculo en función de la frecuencia angular (ω), se realiza el gráfico de la función (Figura 18) respecto de la frecuencia ($f = 1/T$). Se grafica en función de la frecuencia, ya que es la métrica utilizada en el procesamiento de datos de la campaña de medición. En la Figura 4.32 se observa un pico claro en 4,3 Hz y luego, un pico muy atenuado en frecuencias alrededor de los 30 a 40 Hz.

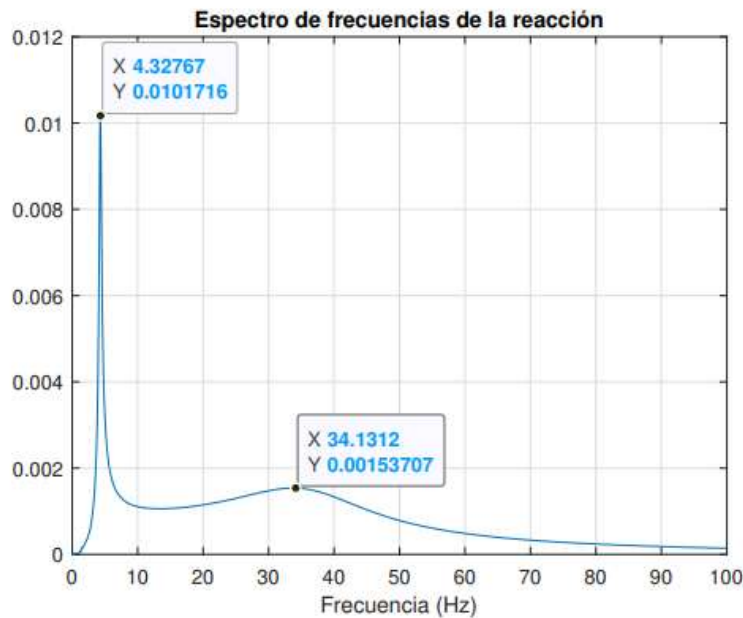


Figura 18: Respuesta en el dominio de la frecuencia

En el gráfico de respuesta, puede verse que influye en la respuesta particularmente el modo 8 correspondiente a la frecuencia natural $f_8 = 4,3029 \cdot \text{Hz}$. En la Figura 4.33 se muestra la forma de este modo, en el cual puede verse que genera solicitaciones en el apoyo.

A partir de este resultado, se puede concluir que el pico que aparece en frecuencias de aproximadamente 5 Hz que se ve en los registros corresponde a una modificación que impone la estructura al espectro de frecuencias típico del tránsito vehicular. Sin embargo, puede verse que el gráfico no es similar a los obtenidos en las mediciones en campo, para poder llegar a esos resultados debería modelarse la carga de los vehículos que circulan por la autopista cuyas frecuencias de excitación están entre los 10 y 30 Hz (Hajek, Blaney, & Hein, 2006).

En el contexto del trabajo para AUSA se realizaron mediciones en el tablero por debajo de la junta y en la base de la pila con el objetivo de comparar los espectros de frecuencias. En la Figura 19 se observa que en el tablero la frecuencia alrededor de los 5 Hz es de gran intensidad y que luego se atenúa fuertemente; esto sugiere que existe una influencia de los apoyos elastoméricos en ese rango de frecuencias.

Organiza:

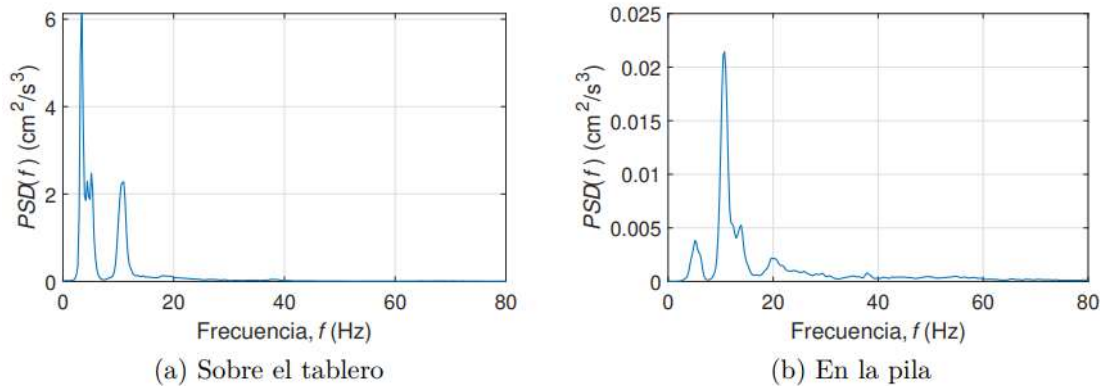


Figura 19: Mediciones sobre la estructura – LABDIN - FIUBA

CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue evaluar el impacto de las vibraciones producto de las autopistas urbanas en el desarrollo de la vida en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, planteando una línea de base de vibraciones a lo largo de toda la traza de la autopista 25 de Mayo y sus continuaciones -Perito Moreno y Dellepiane-. Para esto, se realizó una extensa campaña de medición a lo largo de estas autopista buscando mediciones representativas teniendo en cuenta: (a) si la autopista se encontraba elevada o a nivel, (b) si la pila se encontraba cerca de una junta o entre tramos. (c) si estaba cerca de avenidas de gran flujo vehicular o de una calle y (d) si estaba en coincidencia con la traza del subterráneo o no. Con los registros obtenidos, se obtuvieron las conclusiones que se enumeran a continuación.

En primer lugar, se realizó una línea de base de vibraciones en las inmediaciones de la autopista para evaluar tanto confort como daño cosmético y estructural en las edificaciones linderas. Esto permitió establecer que, para el caso de confort, las vibraciones producidas pueden ser percibidas pero que es poco probable que produzcan molestias en las personas que habitan en las inmediaciones a la autopista. Para el efecto sobre las estructuras, se logró establecer que, excepto en edificios históricos para los cuales no se cuenta con información suficiente, no existirán daños de ningún tipo a las edificaciones, ya que los valores de velocidad pico de partícula medidos se encuentran muy alejados de los valores límites establecidos por la normativa.

En segundo lugar, se buscó caracterizar e identificar las distintas fuentes que actúan en simultáneo con la autopista. Se compararon los registros producto del subte, de la autopista elevada, de la autopista a nivel y de las avenidas.

Se concluyó que el subterráneo genera mayores niveles de vibración que la autopista, pero debido al rango de percepción de las personas -entre 0,5Hz y 80Hz la influencia en el confort es similar; en cambio, para el caso del efecto sobre las estructuras, donde el parámetro es la VPP, que no depende de la frecuencia de excitación, la influencia es mayor. Además, la presencia de avenidas cercanas implica un aumento de la

Organiza:

magnitud de las vibraciones en los ejes x e y - RMS y VPP - y modificaciones en el espectro de frecuencias.

Luego, se realizó un análisis de la influencia de las juntas y del tipo de vehículos que circulan en la magnitud de las vibraciones. Se concluyó que los camiones son los vehículos que tienen mayor impacto en la magnitud obteniéndose valores de 40 a 80 % mayores que cuando solo circulan vehículos livianos. Para el caso de la presencia de juntas amplifican un 20 % respecto de los casos donde se encuentran alejadas.

En este análisis, se identificó que, en las pilas de la autopista elevada cercanas a una junta, existía un pico de vibración en una frecuencia de aproximadamente 5Hz que no aparecía en los casos de autopistas a nivel. Con el fin de explicar esto, se realizó un modelo dinámico de la estructura excitada por una carga impulsiva que representa el paso de los camiones por las juntas.

Al obtener la respuesta en el dominio de la frecuencia, se vio que existe un pico en una frecuencia de 4,3Hz, el cuál es cercano a los encontrados en los registros, permitiendo concluir que la autopista elevada genera modificaciones en el espectro de frecuencias producido por el tráfico carretero (que se encuentra entre 10 y 25Hz).

En conclusión, la operación de las autopistas produce vibraciones similares a otras fuentes de la zona, como puede ser el tráfico en avenidas o el paso de subterráneo. Sin embargo, la estructura elevada introduce una frecuencia característica, en el orden de los 5Hz, que podría afectar a algún tipo particular de estructuras cuya frecuencia propia coincida con ésta. Por otro lado, la magnitud de las vibraciones no implica un potencial de daños en las estructuras, ni siquiera de orden cosmético. El mantenimiento regular de juntas y sola limitación de los vehículos pesados que circulan pueden reducir significativamente las vibraciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Balbi, M. (2012). *Estudio analítico y experimental de la propagación de ondas periódicas en el terreno*. Ciudad de Buenos Aires, Argentina: Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires.
- Bertero, R. D., Lehmann, A., Mussat, J., & Vaquero, S. (2013). Vibrations in neighborhood buildings due to rock concerts in stadiums. *Journal of Structural Engineering*, 1981-1991.
- Bian, X.-c., Jin, W.-f., & Jiang, H.-g. (2012). Ground-borne vibrations due to dynamic loadings from moving trains in subway tunnels. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 870-876.
- Chopra, A. K. (2007). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Pearson .
- Da Gama, C. D. (2002). *Environmental baseline studies of vibrations in urban*. ISRM EUROCK.
- Díaz, J., Ruiz, M., Sánchez-Pastor, P. S., & Romero, P. (2017). Urban seismology: On

Organiza:

- the origin of earth vibrations . *Scientific reports* , 15296.
- Grizi, A., Athanasopoulos-Zekkos, A., & Woods, R. D. (2016). Ground vibration measurements near impact pile driving. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 04016035.
- Hajek, J. J., Blaney, C. T., & Hein, D. K. (2006). Mitigation of highway traffic-induced vibration. *Annual Conference of the Transportation Association of Canada*, 1-13.
- Hao, H., & Thien, C. A. (1998). Analytical modeling of traffic-induced. *American Society of Civil Engineers*, 921-928.
- Konon, W., & Schuring, J. R. (1985). Vibration criteria for historic buildings. *American Society of Civil Engineers*, 208-215.
- Medina, M. (2023). *Caracterización e impacto de las vibraciones producidas por autopistas urbanas*. Ciudad de Buenos Aires: Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires.
- Mussat, J. M., Bertero, R. D., & Barbieri, P. M. (2019). Propagation and Attenuation of Statistically Stationary Ground Vibrations due to Human Activities. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* , 04019059.
- Yang, J., Zhu, S., Zhai, W., Kouroussis, G., Wang, Y., Wang, K., . . . Xu, F. (2019). Prediction and mitigation of train-induced vibrations. *Science of the total environment*, 485-499.

Organiza: