

Interacción suelo-estructura como factor en las vibraciones perceptibles de un edificio en Bogotá

Soil-structure interaction as an influencing factor in perceptible vibrations of a building in Bogota

Fabián Consuegra^{1*}, Camilo Marulanda² y Camilo Phillips¹

¹ Ph.D., Ingeniero Asociado, Ingetec, Bogotá D.C.

² Ph.D., Gerente Técnico, Ingetec, Bogotá D.C.

RESUMEN

Percepción de vibraciones por parte de los usuarios de edificios se presentan de manera recurrente en la ciudad de Bogotá. Aunque los movimientos son percibidos de manera subjetiva por cada persona, el cuestionamiento de la condición estructural es el primer punto de control objetivo del ingeniero a cargo de investigar sus orígenes. El proceso de diseño estructural de edificaciones comúnmente pasa por la presunción de las condiciones de borde en la base de la cimentación en la construcción del modelo utilizado para análisis y diseño. Tanto por dicha simplificación como por la falta de un modelo más preciso en ausencia de lineamientos de la normativa vigente en torno a valores admisibles de vibraciones en condiciones de servicio, la contribución del suelo en la estimación del comportamiento dinámico del edificio suele ser desestimada. Una cimentación conformada por pilotes flotantes hace que el medio semi-infinito de suelo bajo la estructura principal participe en la dinámica de todo el sistema cambiando su comportamiento de aquel similar a un sistema de un grado de libertad fijo en la base (estructura), a uno de dos grados de libertad (estructura y suelo). El sistema compuesto estará sujeto a las condiciones de servicio como viento y tráfico vehicular que pueden inducir movimientos cuyas magnitudes dependen tanto de la naturaleza de la fuente y de la estructura, como las propiedades del suelo. Este último sistema es más flexible que el primero (propio de una estructura sobre roca) y podría ser más propenso a desarrollar vibraciones más notorias bajo condiciones de servicio. En el presente estudio un edificio de configuración estructural y geotécnica (cimentación) típicas para la ciudad de Bogotá fue considerado. Mediciones de vibraciones con acelerómetros de alta sensibilidad bajo condiciones de servicio fueron contrastados con modelos de computadora. El procesamiento de datos revela el efecto de interacción suelo-estructura corroborado con el modelo matemático que mejora la predicción del comportamiento dinámico del sistema después de incluir la flexibilidad del suelo circundante. Este trabajo explora las posibilidades de establecer condiciones típicas de edificaciones en Bogotá susceptibles de desarrollar vibraciones notorias asociadas al efecto de interacción suelo-estructura y las respectivas implicaciones para el diseño sísmico tradicional.

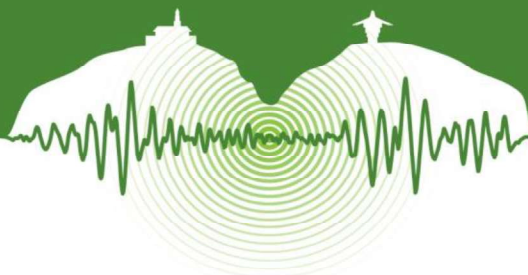
Palabras clave: Vibraciones perceptibles, interacción suelo-estructura, vibraciones inducidas por tráfico, monitoreo dinámico.

ABSTRACT

Although vibration perception is subjective because it depends on each person's tolerance levels, behavior and damage prediction of structural elements under vibration loads should be an objective task. This task requires determining the main vibration source and the boundary conditions for the analysis. Building vibration sources can be divided in two classes; internal sources, such as machinery, HVAC systems, elevators, and the activities of occupants, and external sources like earthquakes, wind, blasting, construction operations, and road traffic. Typically building structural analysis considers fixed boundary conditions at the base, however, it has been found that soil-structure interaction is a key element to predict the structural behavior under vibration loads, because including the foundation system and the stiffness and damping of the soil profile changes the natural period as it becomes flexible. Vibrations induced by external sources (i.e. road traffic) are a frequent problem in medium to tall buildings constructed in Bogotá, in particular for those cases in which the building is located close to main highways and for structures with natural periods close to the fundamental period of the foundation soil profile.

This paper presents a numerical simulation of road traffic vibrations induced on a real building in Bogotá considering the geometry and main properties of the building structure and the foundation stiffness. The numerical model results are compared with rush hour high sensitivity acceleration records. This comparison supports the need to include soil-structure interaction in the model and provides a reference point to identify main conditions that can induce vibration related problems in buildings con-

* fabianconsuegra@ingetec.com.co



structed in Bogotá and its implication on traditional seismic design.

Keywords: building vibrations, soil-structure interaction, traffic-induced vibrations, dynamic monitoring.

1 INTRODUCCIÓN

En el sentido más simple una edificación sobre suelo es un sistema de dos grados de libertad en que el suelo tendrá mayor o menor contribución en la dinámica global en función de las propiedades de la estructura y el suelo mismo. La participación notoria del suelo en las vibraciones del edificio puede estar asociada al fenómeno de interacción suelo-estructura que genera un sistema causal en que la estructura perturba el suelo y viceversa. Dicha interacción puede hacer que las vibraciones de la edificación sean de mayores magnitudes que aquellas que experimentaría la estructura cimentada sobre roca (sistema sin interacción suelo-estructura), además facilita la transmisión de ondas desde la fuente conformada por el tráfico vehicular al sistema estructura-suelo.

El presente trabajo estudia la presencia de interacción suelo-estructura en una edificación de la ciudad de Bogotá sobre la cual se ejecutaron ensayos de monitoreo dinámico mediante acelerómetros. La elaboración de un modelo matemático con la inclusión del efecto del suelo bajo la estructura permitió identificar frecuencias de vibración principales similares a las medidas en sitio y entender la dinámica del sistema. La interpretación de las mediciones mediante procesamiento de datos y la construcción del modelo del edificio considerando la contribución del suelo permitió identificar la interacción suelo-estructura.

2 ETAPA EXPERIMENTAL CON MONITOREO DINÁMICO

2.1 Estructura de estudio

La Figura 2-1 muestra la planta tipo de la edificación del presente estudio en la ciudad de Bogotá, se trata de un edificio irregular en planta con cuatro pisos sobre el terreno y dos sótanos de parqueaderos. La cimentación consiste en pilotes flotantes de 25m de longitud sobre un estrato de arcillas blandas.

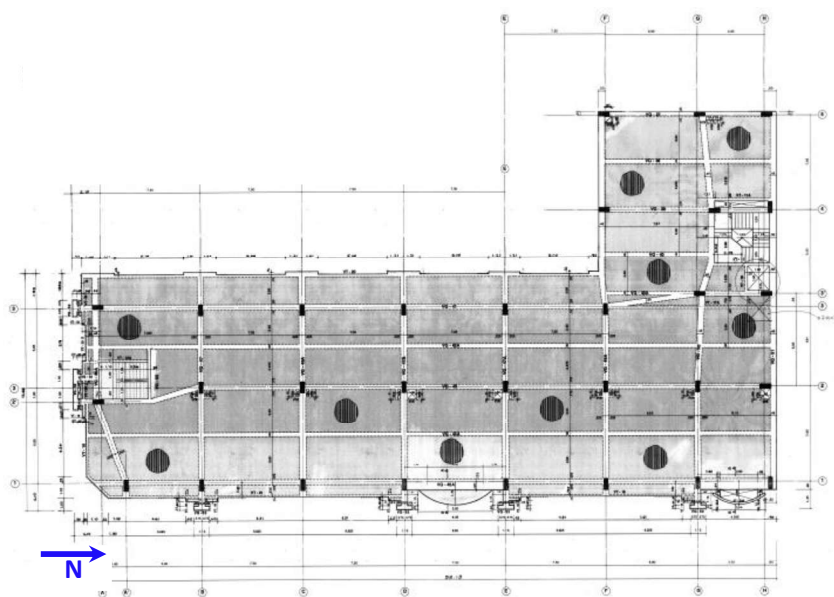
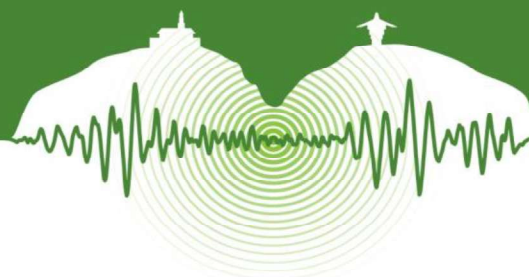


Figura 2-1: Planta tipo de edificio estudio.

2.2 Modelo simplificado

La Figura 2-2 (a) muestra un modelo simplificado de dos grados de libertad asociados a la estructura y la cimentación para representar el comportamiento dinámico de una edificación sobre suelo. En el caso extremo en que el suelo bajo la cimentación es rígido (roca) dicho modelo se reduciría a un grado de libertad similar al de una estructura con base fija, dicho modelo es comúnmente usado para diseño bajo la premisa de obtener mayores solicitaciones de carga en una estructura más rígida a la luz de la forma tí-



pica del espectro sísmico de diseño de la norma (NSR-10). Esta simplificación permite reducir el sistema complejo de la estructura y el suelo de soporte que conforma un medio semi-infinito (Lysmer, 1969) como se muestra en la Figura 2-2 (b).

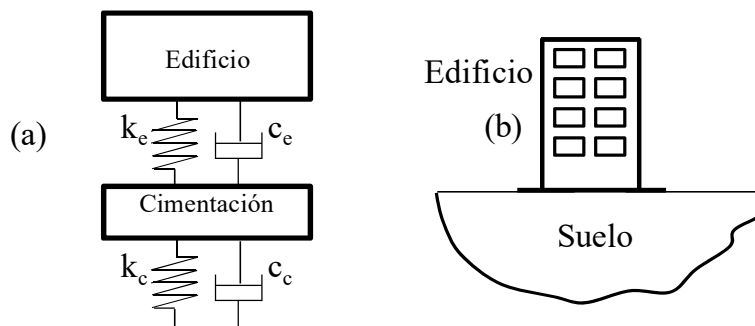


Figura 2-2: Modelo de 2 grados de libertad Estructura-Suelo.

2.3 Frecuencias principales de vibración de cada dirección

Un sistema de acelerómetros de alta sensibilidad combinado con un sistema de adquisición de datos de alta resolución fue usado para ejecutar un extenso programa de monitoreo dinámico con el fin de conocer el comportamiento dinámico de la edificación. Los sensores fueron instalados en diferentes puntos de la edificación para identificar frecuencias y modos de vibración en las dos direcciones principales de la edificación y establecer la relación entre los movimientos de la estructura y el tráfico vehicular circundante. Las vibraciones del terreno adyacente a la edificación y las vibraciones del edificio en cada uno de los pisos fueron medidas. La Figura 2-3 muestra las aceleraciones simultáneas en la dirección NS medidas en cada uno de los pisos en el extremo sur-oeste de la edificación en los dominios de tiempo (a, c y e) y frecuencia (b, d y f), estas últimas obtenidas mediante un espectro de Fourier (Oppenheim, 2006). Los espectros de Fourier identifican una frecuencia fundamental de la dirección NS de 2.6Hz aproximadamente. La observación de dicha frecuencia específica en cada uno de los pisos en una ventana de tiempo aproximada de 3s como en la Figura 2-4, permite observar que las magnitudes de los movimientos son mayores en los pisos superiores que los inferiores, propio de la forma modal fundamental.

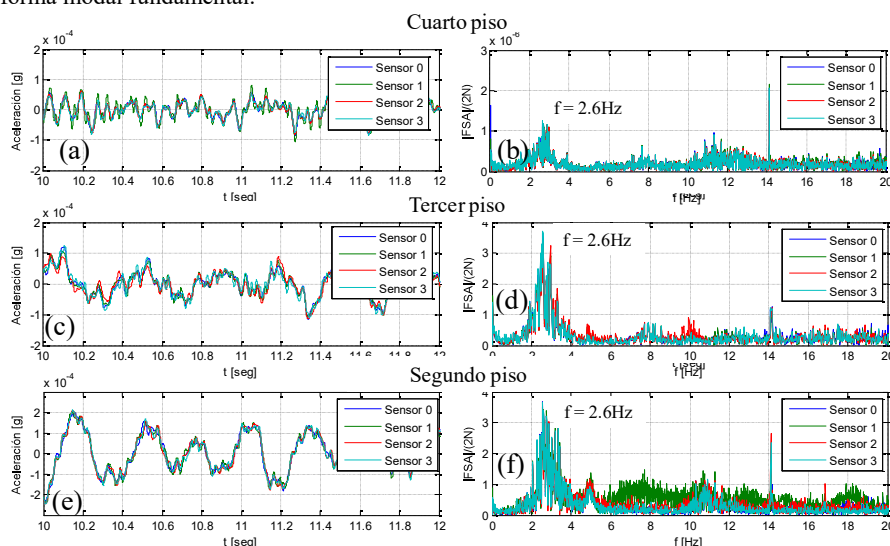


Figura 2-3: Aceleraciones medidas en la dirección NS sobre el extremo sur-oeste de la edificación.

Un análisis similar al de la Figura 2-3 fue realizado para la dirección EW de la edificación con el que se identificó una frecuencia fundamental de la dirección EW de 2.8Hz aproximadamente. Es importante notar que tanto en la Figura 2-3 como en la Figura 2-5 existen varios picos en el espectro del Fourier en la vecindad del pico máximo, lo cual está asociado a diferentes frecuencias de vibración de un sistema con comportamiento no-lineal causado por el cambio de rigidez del sistema con la amplitud de vibración (Consuegra & Irfanoglu, 2012). Esto puede estar asociado a un comportamiento de la estructura que no sigue estrictamente la ley de Hook o que la contribución del suelo en la rigidez total del sistema dependa también de la magnitud de la vibración.

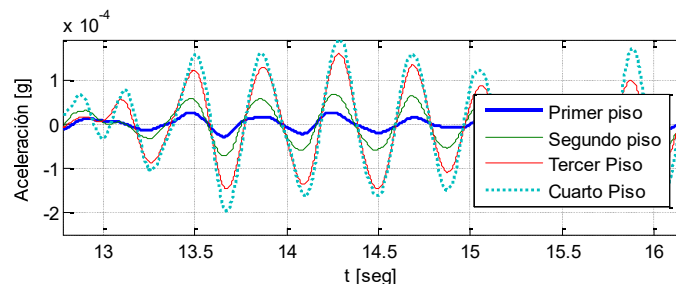
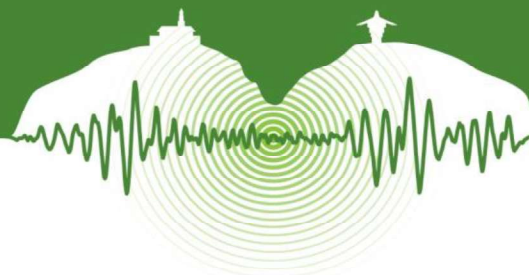


Figura 2-4: Forma modal fundamental dirección NS.

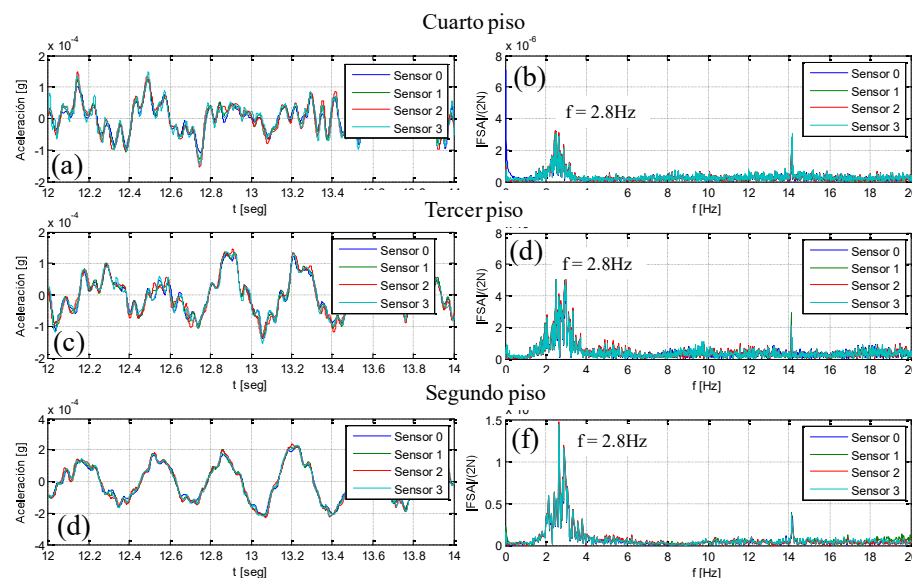


Figura 2-5: Aceleraciones medidas en la dirección EW en el extremo sur-oeste de la edificación.

2.4 Identificación de frecuencias en el suelo y Funciones de Transferencia

La Figura 2-6 muestra el auto-espectro de Fourier medido sobre el suelo en la periferia del edificio. Los valores predominantes de frecuencias entre 2.5Hz y 3.0Hz corresponden a los mismos valores de vibraciones principales del edificio mostrados en la Figura 2-3 y la Figura 2-5, lo cual indica que el suelo circundante también se mueve junto con la estructura ya sea como consecuencia de la vibración de la estructura, o que el suelo se mueve mediante la transferencia de ondas provenientes por ejemplo de las cargas de tráfico cercano y por ende mueve la estructura. Las mediciones de la edificación fueron utilizadas para establecer una función de transferencia entre la base del edificio a nivel del suelo (entrada) y el punto más alto (salida). Figura 2-7 (a) muestra el espectro de Fourier de aceleraciones medidas en el techo de la edificación revelando una frecuencia principal de la estructura similar a la de la Figura 2-5. La función de transferencia calculada con las vibraciones medidas se muestra en la Figura 2-7 (b) en que la frecuencia principal de 3.0Hz es mayor que la frecuencia principal del sistema vibrando, dado que la función de transferencia revela la frecuencia de vibración de la estructura sin interacción suelo-estructura (Safak, 1995), es decir la frecuencia con que vibraría la edificación cimentada sobre roca. La Figura 2-7 (c) muestra la comparación entre la Función de Transferencia medida y aquella calculada para un sistema de un grado de libertad lineal-elástico según la ecuación (1) en donde “m”, “c”, “k” y “W” representan la masa, amortiguamiento, rigidez y frecuencia angular respectivamente. Desviación del comportamiento real de la estructura del modelo lineal son evidencia del comportamiento no-lineal mencionado. Con base en las observaciones anteriores, se puede determinar que existe dependencia entre el suelo y la edificación en la definición del sistema dinámico, por lo cual una representación adecuada debería incluir el efecto del suelo con un modelo simplificado al menos igual al de la Figura 2-2.

$$H(\Omega) = \frac{-m\Omega^2}{-m\Omega^2 + ci\Omega + k} \quad (1)$$

El presente artículo hace parte de las memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica organizado por la Universidad de los Andes y la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Bogotá, Mayo de 2015.

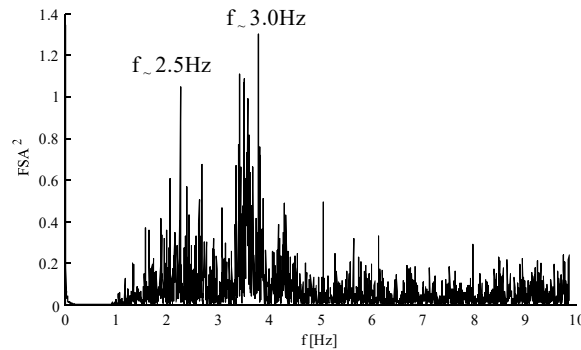
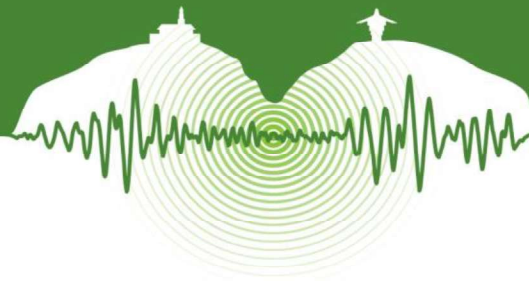


Figura 2-6: Frecuencias principales de vibración detectadas en el suelo.

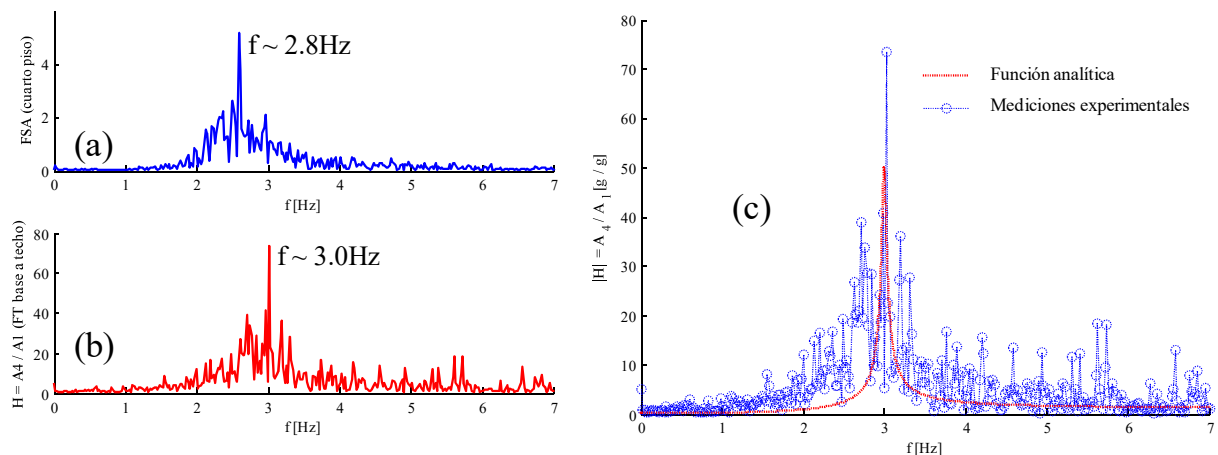


Figura 2-7: Función de transferencia entre la base y el techo del edificio (EW).

3 MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL SISTEMA

Con base en las observaciones anteriores, la modelación propuesta incluye tanto la superestructura (edificación) como el suelo circundante bajo la cimentación similar a la representación física mostrada en la Figura.

3.1 Suelo

La contribución de la cimentación de pilotes junto con el suelo circundante fue introducida mediante la siguiente ecuación en que E_c , I_p , R y f_{x1} son respectivamente el módulo de elasticidad del pilote, su inercia, su radio y un factor que identifica la elasticidad del medio semi-infinito de suelo que circunda el pilote (Brajas, 2010). La estimación de la rigidez total de la cimentación mencionada considerando la interacción entre todos los pilotes corresponde a la formulación de Novak. Las Figuras 3-1 (a), (b) y (c) muestran respectivamente el arreglo geométrico de la planta de pilotes, el valor de interacción para cada par de pilotes y el valor promedio del factor de interacción de grupo por pilote referencia, para el análisis de la dirección vertical de los movimientos del edificio. Esta formulación permitió establecer la rigidez global del sistema de cimentación para incorporarlo en el modelo matemático del sistema.

$$k_{\text{suelo-cimentacion}} = \frac{E_c I_p}{R^3} \cdot f_{x.1} \quad (2)$$

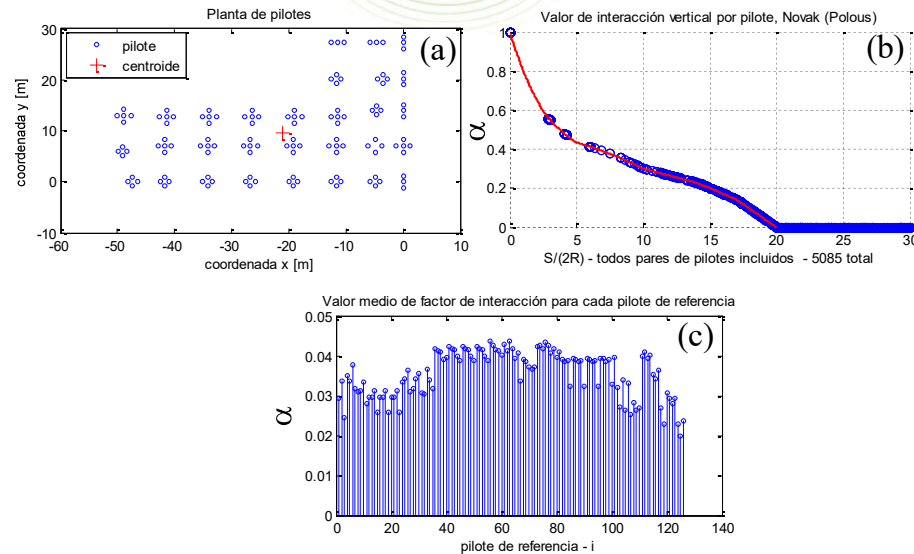


Figura 3-1: Cálculo del efecto del sistema pilote-suelo para incorporar en el modelo matemático.

3.2 Modelo completo

El modelo completo de la edificación con representación de la contribución del suelo puede verse en la Figura 3-2 (a) y la Figura 3-2 (b) puede verse la conformación del sistema estructural de losa, vigas y columnas para representación del sistema de piso. El suelo junto con la cimentación de pilotes fueron introducidos mediante la formulación anterior para las dos direcciones horizontales principales de la edificación, la geometría y propiedades mecánicas de los materiales fueron asignados al modelo con base en información de planos originales de diseño. Las frecuencias fundamentales en cada dirección calculadas con el modelo matemático y que comparan adecuadamente con los valores mostrados en la Figura 2-3 y la Figura 2-5, son de $f_{NS} = 2.4\text{Hz}$ y $f_{EW} = 2.5\text{Hz}$, respectivamente.

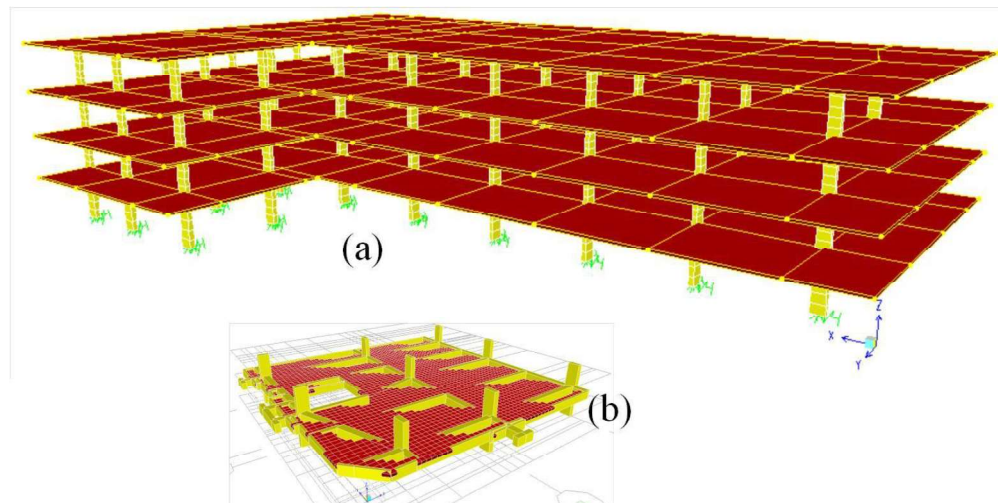
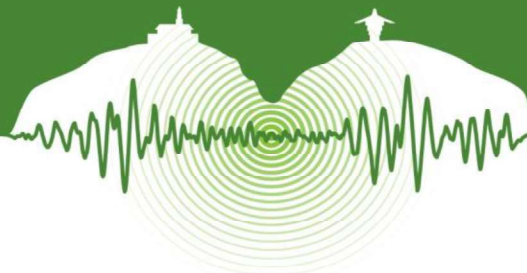


Figura 3-2: Modelo matemático de la edificación con representación del suelo.

4 ORIGEN Y MAGNITUD DE LOS MOVIMIENTOS

El programa experimental de monitoreo dinámico incluyó la medición de los movimientos del edificio bajo la circulación controlada en velocidad y paso de un camión de 30ton, con el fin de identificar la relación entre el tráfico circundante y los movimientos percibidos por los usuarios de la edificación. La Figura 4-1 muestra el arribo del tren de ondas del vehículo circundante medido en la dirección EW, el cual se propaga desde el primer piso a nivel del suelo hasta los pisos superiores en los cuales los movimientos aumentan en magnitud. Experimentos similares fueron realizados para la dirección NS en que se verificó también la relación entre



los movimientos de la edificación y el tráfico circundante. Las magnitudes de las vibraciones medidas fueron cuantificadas con el fin de establecer la condición de riesgo tanto para la edificación como para los usuarios. La Figura 4-2 muestra las vibraciones medidas en el edificio evaluadas según un estándar internacional (ACI, 2004) en que se muestra que las magnitudes son menores y no representan riesgo ni para la edificación ni las personas, lo cual evidencia que incluso para bajos niveles de movimientos el fenómeno de interacción suelo-estructura puede ser un factor que influencia la dinámica estructural de una edificación.

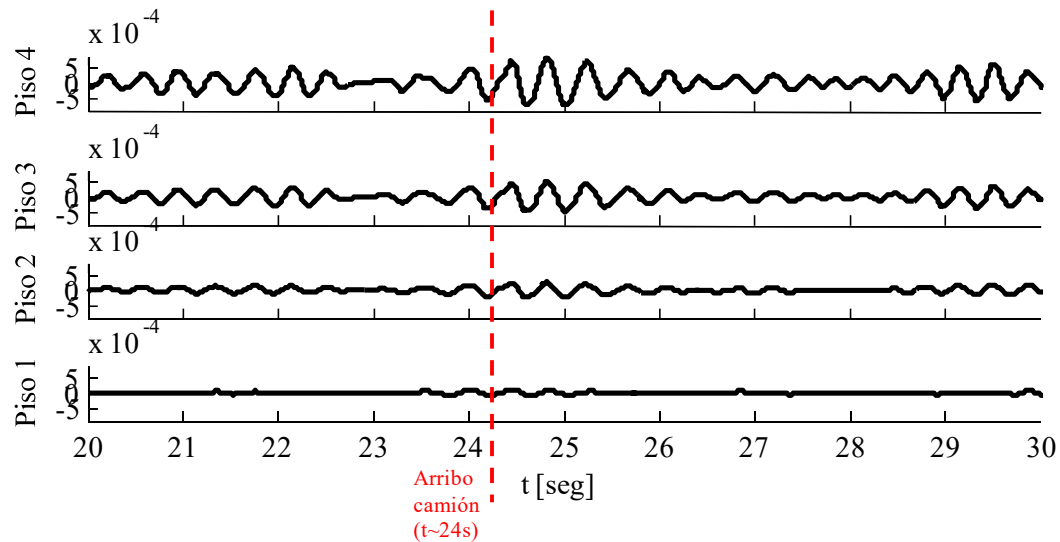


Figura 4-1: Vibraciones en el edificio al paso controlado de un camión de 31 toneladas.

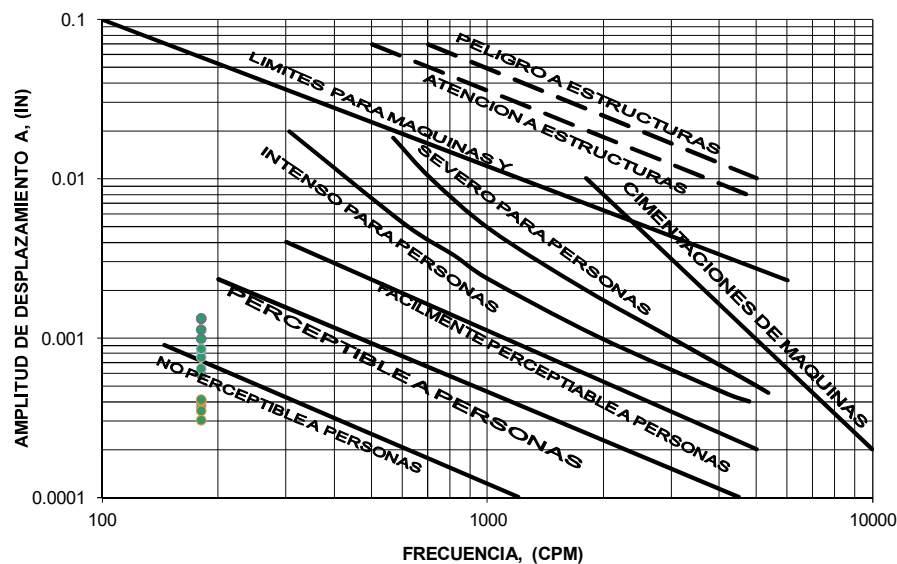
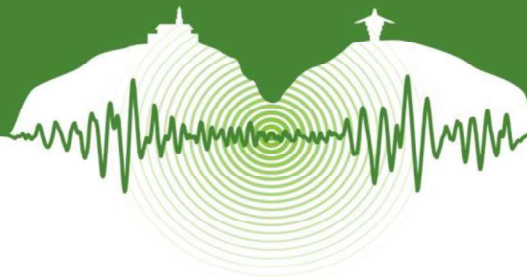


Figura 4-2: Evaluación de vibraciones percibidas en la edificación.



CONCLUSIONES

Los resultados presentados en este artículo muestran como la interacción suelo-estructura constituye un factor importante en la respuesta ante solicitaciones dinámicas. Aunque el estudio desarrollado se centra en la respuesta de una edificación ante cargas vehiculares, la importancia de considerar el cambio en términos de frecuencia del sistema y amortiguamiento del mismo, es un elemento esencial para predecir el comportamiento de las estructuras ante solicitaciones sísmicas. Lo anterior teniendo en cuenta lo observado en eventos como el sismo de México (1985) en donde el mismo sistema estructural tuvo un comportamiento muy diferente dependiendo de la estratigrafía sobre la cual estaba fundado y su cimentación [Bard et al. (1996) y Chávez-García & Brad (1994)].

La consideración de la cimentación en el modelo estructural genera una flexibilización del sistema lo cual se traduce en una disminución de las frecuencias fundamentales de respuesta del mismo. Lo anterior tiene una mayor relevancia en estructuras cimentadas en estratos de suelo blando (como el caso de la mayoría de estructuras construidas en la ciudad de Bogotá) en donde el cambio de frecuencia de vibración por contribución del suelo sería notorio. Un sistema más flexible presenta en general más susceptible a experimentar mayores niveles de vibración. El presente estudio demuestra cómo la inclusión del suelo en el modelo de análisis puede ser relevante. Aunque en la práctica común de diseño se desprecie la flexibilidad del suelo en función de una estimación conservadora de fuerzas según el espectro de diseño, sería importante verificar cuál es el efecto del suelo a la luz del espectro de desplazamiento al introducir más flexibilidad y con ello más solicitaciones de derivas.

REFERENCIAS

- Bard, P.-Y., Guéguen P., and Wirgin, A. 1996. A note on the seismic wavefield radiated from large building structures into soft soil. *Proc. Eleventh World Conf. on Earthq. Engrg.*, June 23-28, Acapulco, México, paper No. 1838, Elsevier Science Ltd.
- Braja. 2010. *Principles of Geotechnical Engineering*, Cengage Learning.
- Chávez-García, F.J., and Bard, P.-Y. 1994. Site effects in Mexico City eight years after the September 1985. *Michoacan earthquakes, Soil Dyn. Earthquake Eng.*, Vol 13, pp. 229-247.
- Consuegra F., and Irfanoglu A. 2012. Variation of small amplitude vibration dynamic properties with displacement in reinforced concrete structures. *Experimental Mechanics*. doi 10.1007/s11340-011-9590-0.
- Lysmer J., and Kuhlemeyer, A. M. 1969. Finite dynamic model for infinite media. *Journal of Engineering Mechanics, Proceeding of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 95, pp. 859-877.
- Oppenheim A., Schafer, R., and Buck J. 2006. *Discrete-Time Signal Processing* (2d Edition). Pearson Prentice Hall
- Safak E. 1995. Detection and identification of soil-structure interaction in buildings from vibration recording. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, N° 5, pp. 889-906.