

Impact of Modeling Walls as Struts on the Dynamic Characterization of Structures using Environmental Noise

Impacto de Modelación de Paredes como Puntales en la Caracterización Dinámica de Estructuras mediante Ruido Ambiental

Autores:

Mgs. Hidalgo-Robalino, Diego Hernan
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
Magister en Ingeniería Estructural
Riobamba – Ecuador



lvinlasaca@ups.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0003-1341-8206>

Mgs. Salazar-Flores, Raúl Alexis
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
Magister en Ingeniería Civil Mención en Estructuras Sismorresistentes
Riobamba – Ecuador



raul.salazar@unach.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0001-6483-2613>

PhD. Cevallos-Velásquez, Oscar Alfredo
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
Doctor (PhD) en Ingeniería de Materiales y Estructuras
Riobamba – Ecuador



ocevallos@unach.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0002-9239-2835>

Mgs. Guerra-Valladares, Marcelo David
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
Magister en Ingeniería Civil
Riobamba – Ecuador



marcelo.guerra@unach.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0003-4119-4959>

Fechas de recepción: 14-JUN-2024 aceptación: 09-JUL-2024 publicación: 15-SEP-2024



<https://orcid.org/0000-0002-8695-5005>

<http://mqrinvestigar.com/>



Resumen

Se compara los resultados de análisis de vibración ambiental in situ con los periodos de vibración de una estructura en dos condiciones: con paredes modeladas como shell y con paredes modeladas como puntales. Para ello, se construyeron modelos analíticos de la estructura en cada una de estas condiciones y se realizaron ensayos de vibración ambiental para obtener los periodos de vibración experimentales. Los hallazgos indicaron que las paredes, modeladas de diferentes maneras, afectan los periodos de vibración de la estructura. Los periodos obtenidos analíticamente para la estructura con paredes modeladas como shell fueron más cercanos a los obtenidos mediante los ensayos de vibración ambiental, en comparación con los modelos con paredes modelados como tipo Shell, por lo que en este caso, el modelado de paredes como shell ofrece una representación más precisa del comportamiento dinámico de la estructura. El hallazgo más relevante del estudio es la importancia de una modelación adecuada de las paredes para predecir con precisión los periodos de vibración de una estructura, lo cual es crucial para el diseño y la evaluación sísmica de edificaciones.

Palabras claves: Diagonal equivalente; estructura de acero; mampostería no estructural; período estructural; ruido ambiental

Abstract

The results of in situ environmental vibration analysis are compared with the vibration periods of a structure in two conditions: with walls modeled as shell and with walls modeled as struts. To do this, analytical models of the structure were built in each of these conditions and environmental vibration tests were carried out to obtain the experimental vibration periods. The findings indicated that walls, modeled in different ways, affect the vibration periods of the structure. The periods obtained analytically for the structure with walls modeled as a shell were closer to those obtained through the environmental vibration tests, compared to the models with walls modeled as a Shell type, so in this case, the modeling of walls as a shell offers a more accurate representation of the dynamic behavior of the structure. The most relevant finding of the study is the importance of adequate modeling of walls to accurately predict the vibration periods of a structure, which is crucial for the design and seismic evaluation of buildings.

Keywords: Equivalent diagonal; steel structure; non-structural masonry; structural period; environmental noise

Introducción

Amenaza sísmica

La continua e incesante ocurrencia de sismos destructivos a lo largo de la historia mundial ha impulsado estudios en la ingeniería sísmica y la ingeniería civil, proporcionando conocimientos cruciales para el desarrollo de la ingeniería estructural sismorresistente. Este campo es esencial para diseñar y construir edificaciones que ofrezcan mayor seguridad y resistencia durante eventos sísmicos. En el cinturón de fuego del Pacífico, el proceso de subducción de la placa de Nazca genera alta sismicidad, con hipocentros superficiales en la costa y profundidades mayores a 200 km en la región oriental. La costa ecuatoriana enfrenta mayor peligrosidad sísmica debido a estos fenómenos, especialmente los sismos superficiales que causan más daño. El terremoto del 16 de abril de 2016, de magnitud 7.8, devastó las provincias de Manabí y Esmeraldas, evidenciando la vulnerabilidad de las estructuras debido a factores como la magnitud del sismo, ampliaciones no reforzadas, grandes desplazamientos en estructuras flexibles y amplificación de ondas sísmicas por efecto de sitio (Beauval et al., 2018).

Mampostería no estructural

En la evaluación de estructuras aperticadas, la discrepancia entre el diseño proyectado por el ingeniero calculista y la estructura construida, junto con la calidad de los acabados y las excesivas derivas permitidas en el análisis, son las principales causas de los daños. El análisis convencional de estas estructuras generalmente considera solo las vigas, columnas y cimentación como el esqueleto estructural, excluyendo los muros divisorios y de fachada. Estos muros, esenciales en cualquier construcción, deberían ser independientes del sistema estructural y no influir en su comportamiento; sin embargo, el aislamiento adecuado de los muros complica y encarece el proceso constructivo. Como resultado, la mampostería suele adosarse a las columnas, restringiendo el movimiento relativo entre pisos y alterando el modelo de análisis original. La mampostería no estructural, comúnmente empleada por su economía y facilidad constructiva, reduce el peso de los muros comparado con los muros de hormigón armado. Es esencial que el ingeniero evalúe la resistencia de la mampostería para garantizar su capacidad de soportar las cargas aplicadas (Uchida et al., 2018).

Período estructural considerando vibración ambiental

Uno de los parámetros dinámicos más estudiados a nivel mundial es el periodo de vibración, debido a su gran importancia. Este parámetro está directamente relacionado con la rigidez del edificio y puede ser afectado por entradas externas como aceleración, respuesta del suelo, materiales, y calidad de la construcción. Usualmente, el periodo de vibración se obtiene de manera analítica usando elementos finitos. Sin embargo, este valor puede alejarse de la realidad si no se considera la interacción entre la estructura y los elementos no estructurales como la mampostería y la interacción suelo-estructura. Debido a las incertidumbres en la

determinación de la respuesta sísmica real de una estructura, dominada por el periodo natural de vibración y el coeficiente de amortiguamiento, se han utilizado métodos in situ como la vibración ambiental para medirlo. Este estudio propone la estimación del periodo fundamental de vibración de estructuras de acero estructural mediante la técnica de vibración ambiental, la cual se ha convertido en el principal método experimental para evaluar el comportamiento dinámico a gran escala (Liu et al., 2018).

Material y métodos

Para alcanzar el objetivo de comparar los periodos de vibración de una estructura en diferentes condiciones y verificar la hipótesis planteada, la investigación se basó en la metodología de la referencia (Meng et al., 2018) y (Simoncelli et al., 2018), con las combinaciones de simulaciones analíticas y ensayos no destructivos in situ experimentales. El estudio se dividió en varias etapas, cada una diseñada para abordar aspectos específicos del comportamiento dinámico de la estructura. La Figura 1 se ilustra de manera global los diferentes pasos seguidos en el estudio.

Figura 1.

Metodología



Descripción de los materiales

Para los materiales existen propuestas de propiedades como la de la referencia (Zerin et al., 2018). Considerando características del entorno, se trabaja con las siguientes propiedades:

Resistencia a la compresión del ladrillo: $[f']_{cu}=4.5$ MPa, resistencia específica a compresión del mortero: $[f']_{cp}=3$ MPa, resistencia a la compresión de la mampostería $[f']_m=1.9796$ MPa, modulo de elasticidad de la mampostería $E_m=1480.263$ MPa, peso específico de la mampostería de 15cm de espesor $\rho=17553.904$ N/m³, peso específico de la mampostería de 17cm de espesor $\rho=18044.236$ N/m³, peso específico de la mampostería de 29 cm de espesor $\rho=17455.837$ N/m³.

Cargas

Las cargas de análisis consideradas en las estructuras modeladas en tres dimensiones fueron consideradas según la normativa: cargas verticales y cargas horizontales. Las cargas verticales consideradas fueron: carga viva y carga muerta (peso propio de las losas, paredes de mampostería, acabados y enlucidos). La carga viva se determinó en función de la ocupación de la edificación. Los valores de las cargas muertas que se asignaron sobre la losa fueron de 1.32 kN/m². Los valores de la carga viva fueron de 1.96 kN/m², valor que se usó en edificaciones de uso para aulas y de 0.48 kN/m², para los volados, en la terraza se usó una carga permanente de 0.686 kN/m². No se consideraron cargas horizontales debido a que en la investigación se necesita las formas modales y los periodos asociados.

El cálculo de las cargas de mampostería para ingresarlos al programa de manera lineal sobre las vigas y sobre las losas se las ingresó por metro cuadrado. El cálculo del peso propio de la losa lo realizó automáticamente el programa en base a las características geométricas de la placa colaborante y el hormigón sobre la placa, las mismas que fueron verificadas.

Tabla 1.

Cargas muertas en las losas

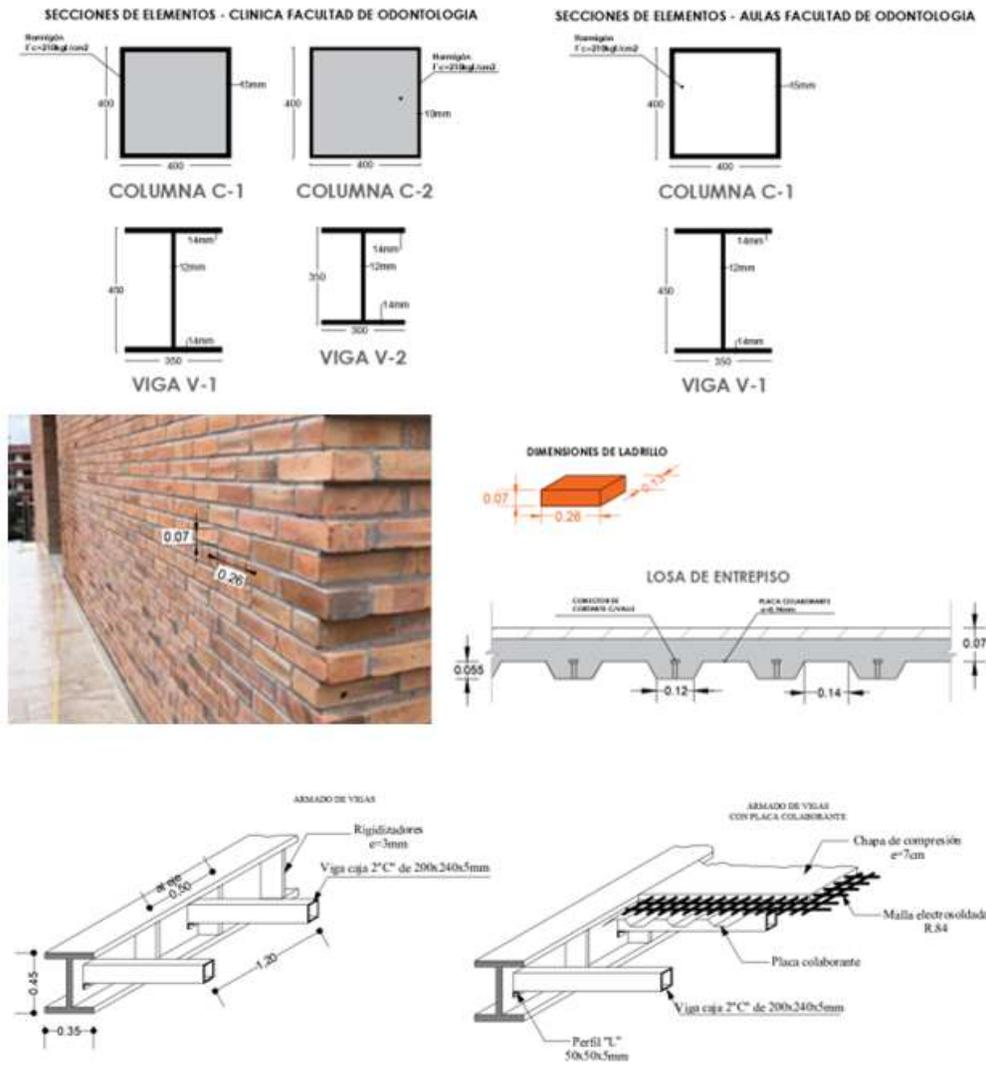
Carga permanente en losa		
W instalaciones	98.06	N/m ²
W cerámica	196.13	N/m ²
W contrapiso H.S (e=2,5cm)	539.36	N/m ²
W placa de yeso por cada mm de espesor	7.84	N/m ²
Revoque de yeso y listones metálicos suspendidos	478.76	N/m ²
TOTAL	1320.17	N/m²

Caso de estudio

La generación del modelo se orientó en base a los planos constructivos y visitas periódicas. Se corroboró alturas, secciones de los elementos estructurales y distancias entre ejes. Para las mamposterías se realizó un detallado levantamiento para asegurar la precisión en el modelo.

Figura 2.

Detalles constructivos del caso de estudio.



Modelación estructural

Se generaron dos modelos planos y dos tridimensionales de la estructura. El modelo del pórtico plano de tres pisos considerando la mampostería tipo Shell y la mampostería como diagonal, se utilizó para comparar la rigidez. Cada modelo fue sometido a análisis dinámico para determinar los periodos de vibración en las direcciones X e Y.

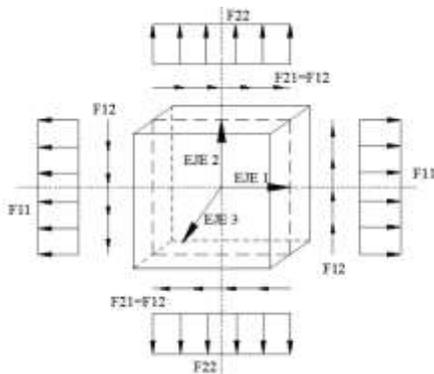
La modelación de los muros de mampostería confinada se la realizó usando diagonales equivalentes y elementos tipo "Shell", para la mampostería de ladrillo. Para la modelación de las mamposterías de ladrillo con elementos "Shell", se ingresaron las siguientes propiedades: módulo de elasticidad, módulo de Poisson, peso específico, masa por unidad de volumen para que se calcule el peso y la masa propia del muro.

Mampostería como elementos tipo “Shell”

Los elementos tipo “Shell” tienen tres grados de libertad, razón por la cual, el elemento “Shell” puede absorber los esfuerzos. Además, las dimensiones son comparables entre sí, o bien dos de sus dimensiones son más grandes que la tercera. Se utiliza principalmente para modelar áreas que pueden ser de losas y muros de mampostería, o cualquier estructura que presente la condición antes planteada. Para asegurar una conexión adecuada de los nodos entre los elementos tipo “Shell”, se debe discretizar a los elementos grandes en elementos más pequeños, pero que no sean muy pequeños, debido a que, si se disminuye en exceso el tamaño de los elementos finitos, el modelo se vuelve más flexible, más allá del rango aceptable, y además provoca inestabilidad en el programa (Chen et al., 2018)..

Figura 3.

Fuerzas internas del elemento Shell que actúan en el plano de la membrana.



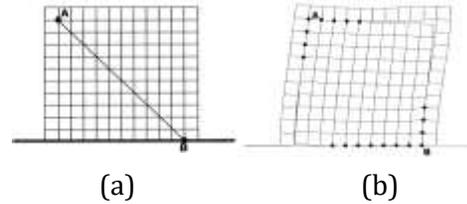
Mampostería como diagonales equivalentes

Investigaciones previas como (Asteris., 2018), presentan resultados analíticos sobre la influencia del tamaño de la abertura y su posición en la pared de mampostería en la respuesta sísmica de los pórticos rellenos de mampostería, según el método de los puntos de contacto. Aquí, la principal condición límite física entre la mampostería de relleno y el pórtico es que el panel de relleno no puede entrar en el pórtico circundante; las únicas condiciones naturales aceptadas entre la mampostería de relleno y el pórtico son el contacto o la separación (puntos de contacto). El problema se estudia en la región elástica y la relación de reducción de rigidez estimada, definida como la rigidez con la abertura de la pared que se utiliza para la comparación con los datos bibliográficos. La acción general entre el marco y el relleno se ve afectada negativamente a medida que la posición de abertura se mueve hacia la diagonal de compresión, es decir la estructura se vuelve más flexible. Las diagonales equivalentes, que simulan la presencia de los muros de mampostería confinada, se modelaron como marcos reforzados con diagonales (Braced Frame Model). Las dimensiones de las diagonales equivalentes se calcularon en función de tablas de factores de reducción de rigidez para la simulación de muros de mampostería que presentan aberturas a diferentes ubicaciones. Para

modelar la diagonal equivalente, se necesita el valor del peso específico y masa por unidad de volumen con valores iguales a cero, ya que el peso y la masa de la diagonal no representa el peso y la masa de una pared. Por lo tanto, se asignó de forma independiente en el modelo el peso y la masa de la pared como cargas distribuidas y masas adicionales sobre las vigas que soportan los muros.

Figura 4.

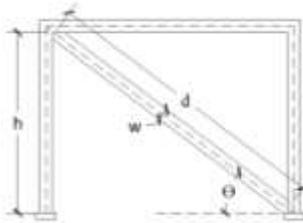
Mallado de mampostería. (a) Diagonal en compresión, (b) Puntos de contactos de mampostería en compresión (Asteris., 2018).



En la misma investigación se desarrolló un modelo matemático para el estudio de los pórticos con diagonales equivalentes que simula la presencia de mampostería, con aberturas en: 1) la esquina superior, 2) esquina inferior, y 3) en el centro de la pared, y variaciones en el tamaño de la abertura de la pared comprendidas entre el 0% y 25%. Luego de definir la ubicación y el porcentaje de abertura, se obtuvieron los factores de reducción de rigidez λ a utilizar en la obtención de las dimensiones de la diagonal en compresión, usando las curvas mostradas.

Figura 5.

Parámetros para el análisis de la diagonal equivalente.



$$\left(\frac{w}{d}\right) = 0.175\lambda (\lambda h)^{-0.4} \tag{1}$$

$$\lambda h = h \sqrt[4]{\frac{E_b t \sin 2\theta}{4 E_s I_c h}} \tag{2}$$

Donde:

λ = factor de reducción de rigidez

λh = rigidez relativa

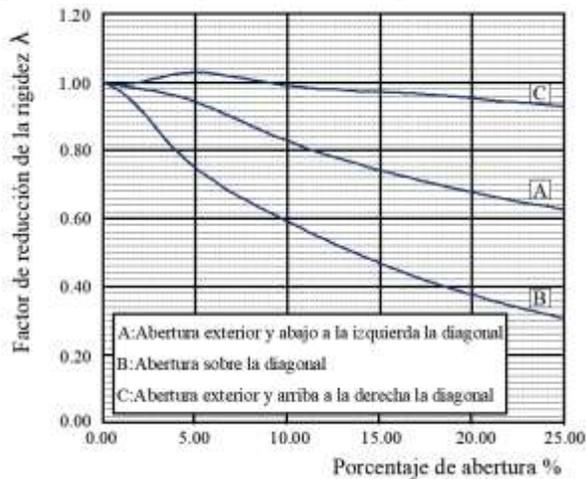
h = altura de la mampostería



E_b = módulo elástico de la mampostería
 t = espesor de la mampostería
 I_c = inercia de columnas
 E_s = módulo elástico del marco armado
 θ = ángulo entra la diagonal y la horizontal
 d = longitud de la diagonal
 w = ancho efectivo de la diagonal

Figura 6.

Factor de reducción de la rigidez λ del marco lleno en relación con el porcentaje de abertura para diferentes posiciones compresión (Asteris., 2018).



Ensayo de vibración ambiental

Para realizar los monitoreos de vibración ambiental se utilizó el sismógrafo Raspberry Shake RS3D, el sismógrafo consta con tres sensores de alta precisión los cuales permitieron detectar las señales en dirección norte – sur (N-S) y en la dirección este – oeste (E-O), y en la dirección vertical (R. E. et al., 2018). Se utilizó un solo sensor ubicado en la parte alta de los edificios para obtener los registros de vibración ambiental y mediante el sismógrafo medir las aceleraciones (García et al., 2018).

Para la extracción de datos se lo realizó a través de la aplicación FILEZILLA. Esta aplicación permite entrar al repositorio de Raspberry y descargar los datos de manera rápida del servidor. En esta aplicación web se configuró el equipo para ponerlo en fuera de línea. Una vez extraídos los datos, se los cargó en el programa SWARM.

Se convirtió los datos de counts a aceleración y se realizó la conversión para poder analizar los datos en geopsy. El valor del tiempo se lo colocó con un intervalo de 0.01s y el valor de counts se lo transformó a aceleración utilizando el factor 386825. Este factor se convirtió de counts a m/s². Este valor es dado por el propio equipo.

Para el cálculo de la frecuencia natural de vibración se utilizó el programa geopsy. Este programa nos va a ayudar para analizar el espectro de frecuencia que está en función del tiempo y aceleración. Se corrigió la línea de ceros y se asignó la hora exacta cuando se realizó el ensayo de vibración con el equipo. Se utilizó el método de Hamming.

Figura 7.

Ubicación del Raspberry en la terraza de la edificación.



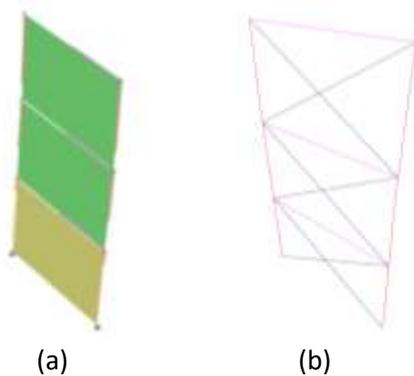
Resultados

Modelo 2D

En base al planteamiento explicado en los métodos, se realiza el análisis de modelos matemáticos y la verificación de la influencia de la rigidez considerando la mampostería tipo Shell y como una diagonal equivalente.

Figura 8.

Pórticos en dos dimensiones de acero estructural con mampostería de ladrillo (a) modelada tipo shell (b) modelada tipo diagonal.



Modelo 3D

Se modela el edificio en 3D, obteniendo los modos de vibrar de la estructura. Se puede observar la ubicación de la mampostería, la cual se modelo de tipo wall y se tomó en cuenta solo las mamposterías ubicadas entre ejes principales y que no poseen aberturas, de manera que aporte rigidez al sistema. La estructura tiene un periodo de 0.53 seg en X y 0.29 seg en Y.

Figura 9.

Modelo analítico del Edificio 1. a) Modo de vibración 1, sentido X. b) Modo de vibración 2, sentido Y.

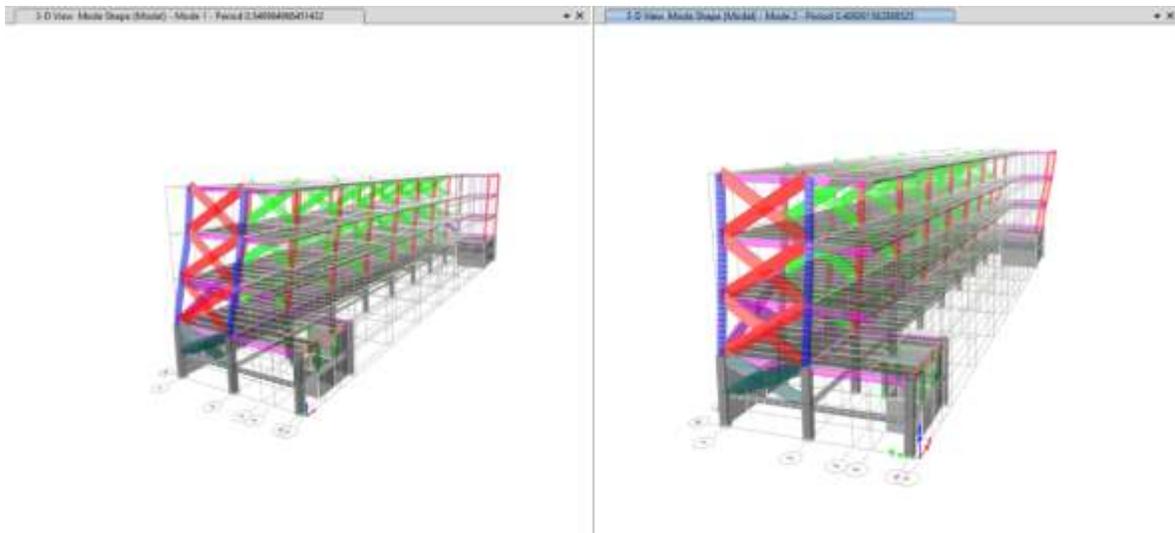
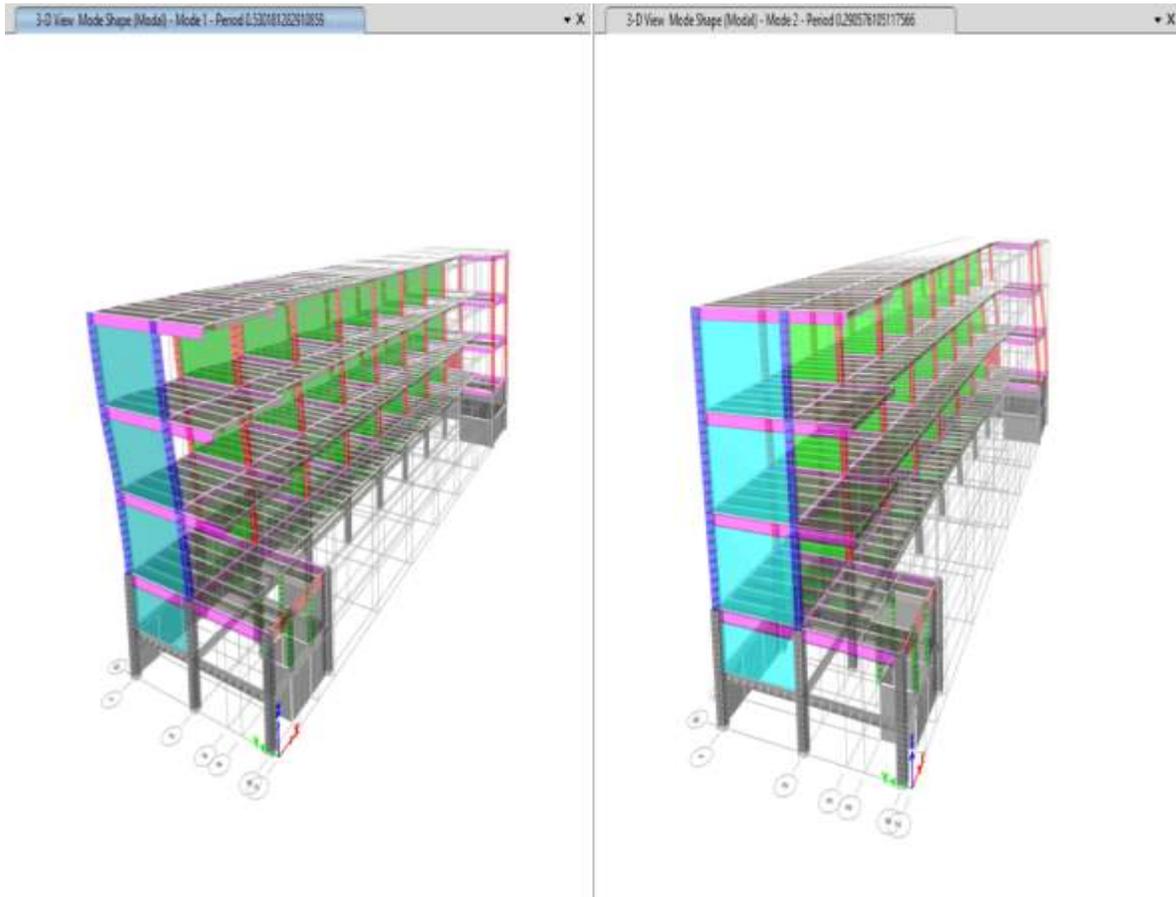


Figura 10.

Modelo analítico del Edificio 2. a) Modo de vibración 1, sentido X. b) Modo de vibración 2, sentido Y.



Vibración ambiental

Se realizaron ensayos de vibración ambiental utilizando acelerómetros de alta sensibilidad colocados estratégicamente en la estructura. Los datos de vibración ambiental se registraron durante 24 horas para capturar una amplia gama de frecuencias. Los periodos de vibración se calcularon mediante análisis espectral de los registros obtenidos.

En la dirección X la frecuencia es de 1.91Hz, equivalente a periodo de 0.523s. En la dirección Y la frecuencia es de 3.84Hz, equivalente a periodo de 0.26 s.

Análisis de vibración ambiental

El raspberry se colocó en la terraza del edificio, específicamente en el centro para de esta manera captar las mayores aceleraciones para poder obtener datos representativos para realizar su respectivo análisis.

Figura 11.

Frecuencia en X, edificio 2.

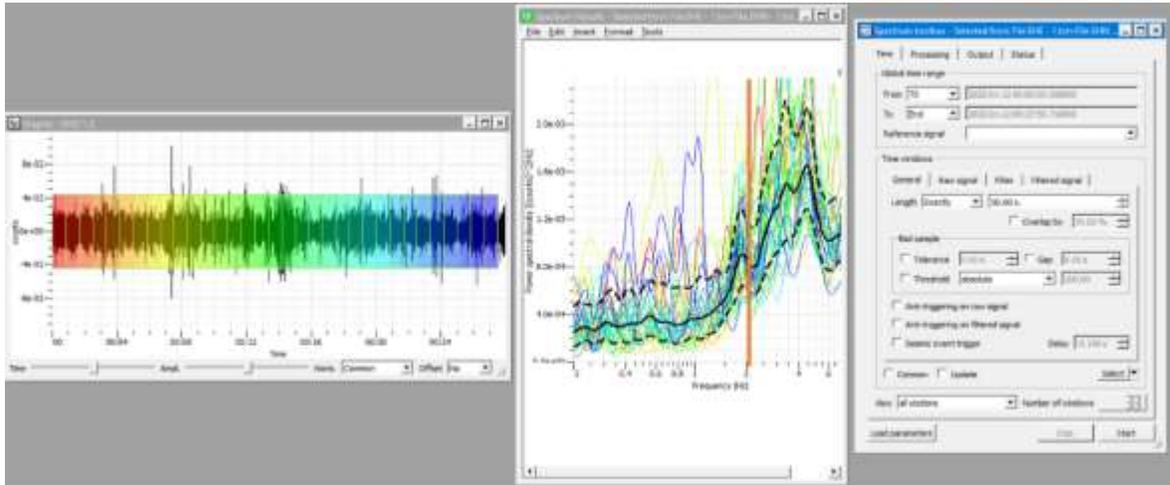
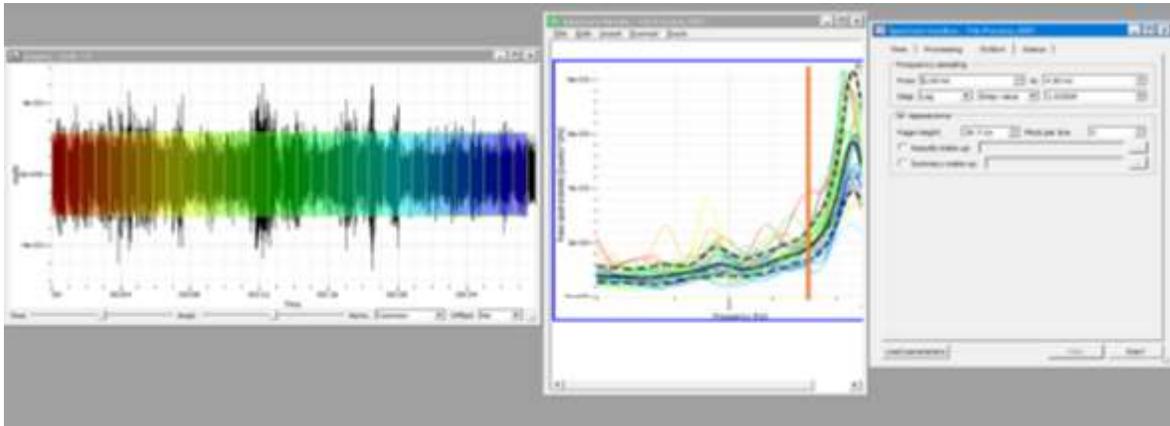


Figura 12.

Frecuencia en Y, edificio 2.



Períodos

En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos de los periodos de vibración analíticos y experimentales y su respectivo error en porcentaje.

Tabla 2.

Periodos de vibración edificio.

Dirección	X	Y
Periodo analítico (mampostería tipo Shell)	0.53	0.29
Periodo analítico (mampostería diagonal puntal equivalente)	0.55	0.40
Periodo experimental (vibración ambiental)	0.52	0.26
Diferencia entre periodo experimental y periodo analítico con mampostería tipo Shell	1.92%	11.54%
Diferencia entre periodo experimental y periodo analítico con mampostería diagonal puntal equivalente	5.77%	53.85%

Análisis de resultados

El periodo de vibración entre uno de los parámetros de los cuales depende es de la rigidez y la masa, en los modelos se tiene la misma masa pero se aprecia una diferencia en los resultados del periodo fundamental de vibración esto se debe a que al modelar la mampostería tipo Shell aporta mayor rigidez al sistema a diferencia de modelar la mampostería como puntal diagonal equivalente.

Conclusiones

La metodología empleada, que combinó simulaciones analíticas y ensayos de vibración ambiental, demostró ser efectiva para alcanzar el objetivo del estudio y verificar la hipótesis planteada. Los resultados indicaron que el modelado de paredes como puntales con rigidez equivalente proporciona una representación más precisa del comportamiento dinámico de la estructura, lo que es crucial para la evaluación y diseño sísmico de edificaciones. Este hallazgo resalta la importancia de una modelación adecuada de las paredes para mejorar la precisión de los modelos estructurales.

Referencias bibliográficas

- Asteris, P. (2003). Lateral stiffness of brick masonry infilled plane frames. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 129(7), 1071.
- Beauval, C., Yepes, H., Alvarado, A. P., Alvarado, G. E., Singaicho, J. C., Aguilar, J., ... & Bauso, D. (2018). A new seismic hazard model for Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(3A), 1443-1464.
<https://doi.org/10.1785/0120170259>
- Chen, R., Qiu, P., Song, P., Deng, B., Wang, Z., & He, Y. (2023). Masonry shell structures with discrete equivalence classes. *ACM Transactions on Graphics*, 42(4), 1-12.
<https://doi.org/10.1145/3592095>.
- García, C., & Antonio, D. (2016). Análisis teórico experimental de la variación del periodo fundamental durante el proceso de construcción de un edificio de acero.

- Liu, H., Lin, X., Gong, Z., & Shi, J. (2023). Combined annoyance assessment of ship structural vibration and ambient noise. *Buildings*, 13(2), 363. <https://doi.org/10.3390/buildings13020363>
- Meng, F., Ma, Y., Xia, Y., Ma, Y., & Jiang, M. (2023). Investigation of modal identification of frame structures using blind source separation technique based on vibration data. *Applied Sciences*, 13(12), 7249. <https://doi.org/10.3390/app13127249>.
- NEC-SE-HM. (2015). *Estructuras de hormigón armado*. Quito.
- R. E. Anthony, A. T. Ringler, D. C. Wilson, and E. Wolin, "Do low-cost seismographs perform well enough for your network? An overview of laboratory tests and field observations of the OSOP raspberry shake 4D," *Seismological Research Letters*, vol. 90, no. 1, pp. 219–228, 2019, doi: 10.1785/0220180251.
- Simoncelli, M., Aloisio, A., Zucca, M., Venturi, G., & Alaggio, R. (2023). Intensity and location of corrosion on the reliability of a steel bridge. *Journal of Constructional Steel Research*, 206, 107937. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.107937>.
- Uchida, B., Sanada, Y., Yoon, R., Quan, C., & Zhao, P. (2023). Experimental structural performance evaluation of 2.5-story model frame representing lower stories of high-rise RC buildings with flat walls. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, 88(809), 1197-1207. <https://doi.org/10.3130/aijs.88.1197>.
- Zerin, A. I., Hosoda, A., Salem, H., & Amanat, K. M. (2017). Seismic performance evaluation of masonry infilled reinforced concrete buildings utilizing verified masonry properties in applied element method. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 15(6), 227-243. <https://doi.org/10.3151/jact.15.227>.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

N/A

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.