



Interacción Suelo Estructura: una Revisión del Estado del Arte

Fabio L. Acuña Izquierdo¹

Fabioacuna@unisinu.edu.co

<https://orcid.org/0009-0007-3095-850X>

Universidad del Sinú – Elías Bechara Zainum,
Montería, Córdoba.
Colombia

Jonathan Smith Castilla

Jonathansmith@unisinu.edu.co

<https://orcid.org/0000-0003-3245-8502>

Universidad del Sinú – Elías Bechara Zainum,
Montería, Córdoba.
Colombia

Maily Luna Villadiego

mailyluna@unisinu.edu.co

<https://orcid.org/0009-0007-3587-5463>

Universidad del Sinú – Elías Bechara Zainum,
Montería, Córdoba.
Colombia

Johann A. Barrios Valverde

Johannbarrios@unisinu.edu.co

<https://orcid.org/0009-0009-2825-0523>

Universidad del Sinú – Elías Bechara Zainum,
Montería, Córdoba.
Colombia

RESUMEN

En la actualidad algunos códigos de diseño estructural tienen excluido el uso de los efectos de interacción suelo estructura y lo proponen que sea a criterio del diseñador el uso o no de estos, lo que hace que no se realice un buen análisis y diseño de la estructura considerando los efectos de sitio, es por ello que algunos autores a través de los años han logrado realizar investigaciones que logran demostrar que considerar los efectos ISE y compararlos con el análisis de la estructura con base empotrada tienen mucha incidencia en los resultados. En el modelamiento de estructuras es necesario considerar el efecto de sitio para analizar parámetros establecidos sobre la edificación, por ello se necesita establecer más investigaciones en el área de Interacción suelo estructura y lograr unificar un criterio sólido para incluir este análisis obligatorio en los diseños estructurales. Este documento investigativo sobre el estado del arte de los efectos ISE sobre las estructuras sirve como referencia a investigaciones futuras en el tema para considerar dichos efectos en el comportamiento de las estructuras especialmente en datos de salida como periodos de la edificación, derivas de piso y amortiguamiento.

Palabras clave: *interacción suelo-estructura; análisis dinámico; ingeniería sísmica*

¹ Autor principal.

Correspondencia: Fabioacuna@unisinu.edu.co

Soil-Structure Interaction: A Review of The State of The Art

ABSTRACT

At present, some structural design codes exclude the use of soil-structure interaction effects and suggest that the use or not of these effects is at the discretion of the designer, which means that a good analysis and design of the structure considering the site effects is not performed, which is why some authors over the years have managed to conduct research that demonstrates that considering the ISE effects and comparing them with the analysis of the structure with embedded base have a great impact on the results. In the modeling of structures it is necessary to consider the site effects to analyze established parameters on the building, therefore it is necessary to establish more research in the area of Soil Structure Interaction and to unify a solid criterion to include this mandatory analysis in the structural designs. This research paper on the state of the art of ISE effects on structures serves as a reference for future research on the subject to consider such effects in the behavior of structures especially in output data such as building periods, floor drifts and damping.

***Keywords:** soil-structure interaction; dynamic analysis; seismic engineering*

Artículo recibido 20 julio 2023

Aceptado para publicación: 20 agosto 2023

INTRODUCCIÓN

Desde la década de los 70 se ha generado mucho interés para considerar los efectos de interacción suelo estructura (ISE), (Paul C. Jennings, 1973), (Meek, 1974), en sus primeras pruebas lograron evidenciar que el periodo fundamental y el amortiguamientos podrían variar al considerar los efectos ISE. Sin embargo en investigación realizada por (Anand et al.,2018) demuestran que la respuesta del suelo ante los efectos ISE influye en el movimiento de la estructura. Por lo general cuando se modela una estructura se colocan apoyos fijos en la base, entonces no se consideran los efectos ISE , lo que hace que se modifiquen las propiedades dinámicas de la estructura. En la actualidad existen disposiciones sísmicas permiten ignorar los efectos ISE.

Después de revisar la literatura, (Bielak, 1976), (Javier Avilés, 1996) concluyen que al considerar los efectos ISE el periodo natural aumenta y cambia el amortiguamiento de la estructura debido a la flexibilidad del suelo. El objetivo de esta revisión en este documento trata de buscar varias pautas para establecer los parámetros ISE que pueden afectar el comportamiento sísmico de una estructura. Al igual se muestran avances de investigación en este tema de ISE.

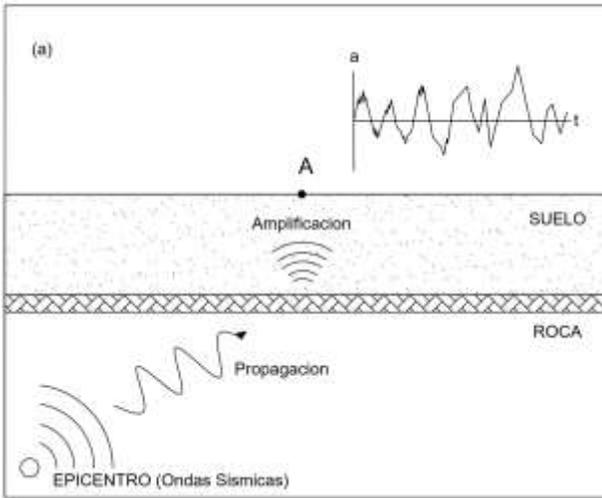
Además se evidencia que es necesario continuar realizando investigaciones más a fondo para determinar prácticamente la incidencia de considerar o no los efectos ISE y cómo afectan estos los parámetros como periodo de la estructura, amortiguamiento y derivas de piso de la estructura.

METODOLOGÍA

Interacción Suelo- Estructura

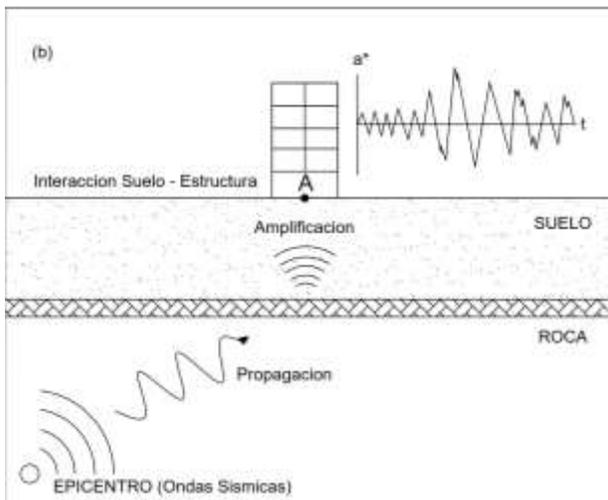
Se define el efecto de interacción suelo-estructura según (Soriano, 1989) es la forma en que la presencia de la estructura afecta las características de movimiento del terrero donde está expuesta la misma, considerando dos puntos de vista de comparación del suelo un comportamiento cuando esta la estructura y el otro si esta no estuviese (Espinoza, 1999), la figura 1.a ilustra el comportamiento dinámico de la transmisión de ondas sísmicas de un punto llamado EPICENTRO hasta el punto donde se encontrara la edificación y la figura 1.b Muestra cómo cambia la aceleración espectral al estar presente la estructura en el sitio.

Figura 1 (a) Comportamiento dinámico de transmisión de ondas sísmicas hasta el sitio donde se encontrará la estructura.



Fuente: (Soriano, 1989).

Figura 1 (b): Cambio de aceleración espectral con la presencia de la estructura



Fuente: (Soriano, 1989).

En investigación reciente realizada por (Huseyin Cilsalar, 2020), se logra concluir que los efectos ISE tiene gran incidencia en la respuesta sísmica de la estructura, cuando se consideran las propiedades del suelo donde es cimentada.

Mientras tanto (Khalil L., 2005) se logra evidenciar que es benéfico considerar en un sistema

estructural con base flexible los efectos ISE bajo cargas sísmicas, en comparación cuando se realiza con base empotrada debido a que estos tienen incidencias directas con el periodo fundamental y el amortiguamiento del sistema. Entonces a no considerar los efectos ISE se habla de un proyecto netamente conservador (Espinoza, 1999).

Por tal motivo es necesario incluir los efectos ISE, para lograr una mejor respuesta sísmica de la estructura, donde se evidencia que las características del sitio donde está expuesta la edificación, su cimentación y el sistema estructural inciden en el comportamiento dinámico, y los efectos locales presentados en la edificación dependen del evento sísmico, de las características del suelo y de la región (SISMICA, 2010).

Investigaciones realizadas por (Chopra et al, 1985) concluyen que estructuras apoyadas en suelo flexible con posible desprendimiento presentan efectos benéficos y que estas dependen de los parámetros del sistema y de características de la fuente de excitación.

Se han realizado numerosas investigaciones acerca de los parámetros que afectan la ISE son la geometría de la edificación, la cimentación, el módulo del suelo y el perfil de velocidad de onda de corte (Ciampoli, 1995) se identificaron la relación estructura – rigidez del suelo. Mientras que (Van Nguyen, 2017) demostraron que las características de la cimentación de las zapatas superficiales y las profundas como pilotes afectan la respuesta sísmica de los ISE.

Para resolver un problema de ISE se plantearon algunas ideas donde una de ellas fue encontrar una solución analítica que demostrara la incidencia de este efecto ISE ante la estructura. Investigación realizada por (Kayna, 1991) presentaron una solución utilizando una técnica de transformación integral para analizar la respuesta dinámica de un grupo de pilotes en un semiespacio estratificado, aunque esta técnica posee un problema debido a que es muy costosa por la tecnología computacional que toca aplicarle para lograr resultados.

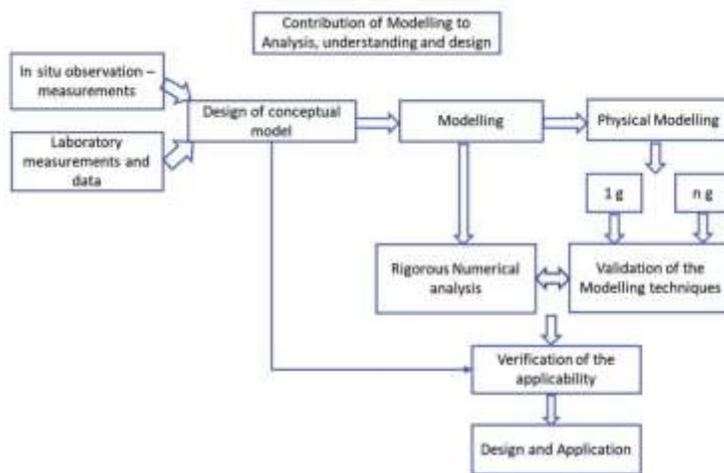
Forma de modelado de los efectos de interacción suelo estructura

En la actualidad el modelamiento de estructura aplicando los efectos ISE, es realizado en diferentes tipos de software estructurales, prototipos a escala o modelos físicos. Los modelos físicos muestran

una forma clara de ver las mediciones de los cambios de la estructura al ser sometida a requerimientos de cargas, deja comprender las relaciones en los parámetros medidos que no se pueden expresar matemáticamente (Frostick et al. 2011). La investigación realizada por (Shiau et al., 2016) han demostrado los beneficios en la enseñanza practica e investigativa en utilización de modelos a baja escala. Realizar el modelamiento de las estructuras a tipo escala o en programas estructurales está ligado a la limitación de costos que tiene el investigadores para poder encontrar los resultados aproximados debido a su modelo (Wood, 2003; Green, 2014).

Hay varias formas de realizar un modelado de una estructura a pequeña escala, puede ser en centrifuga o bajo gravedad simple, estos modelamientos son una pequeña fracción de las pruebas que se realizarían a escala real según las investigaciones realizadas por (Marwan et al., 2014) Se han encontrado beneficios que pueden traer el modelado físico de estructuras a pequeña y gran escala en los parámetros de interacción suelo estructura, donde se pueden analizar y validar los datos teóricos con los experimentales. Figura 2.

Figura 2 Diagrama de Análisis de Problemas de Ingeniería Física



El modelamiento estructural de una edificación empieza con el propósito del estudio y la hipótesis de este las cuales deben ser resueltas utilizando el modelamiento estructural. Los pasos principales para construir el modelo es determinar las dimensiones del modelo, las condiciones del suelo y el sitio o ubicación de la estructura. Con este prototipo a mediana escala la cual simula la gran escala se

pretenden encontrar los parámetros que afectan dicha estructura y compararlos con los datos teóricos del modelo (Marwan Al Heib, 2020).

En la investigación realizada (Luco, 2005) detalla los resultados obtenidos de un ensayo a escala (1/4) de una estructura de concreto reforzado, realizado con el fin de determinar parámetros tales como el amortiguamiento, frecuencias modales, factores de participación de masa asociados a los movimientos de traslación y cabeceo de la base. Concluyendo estos autores que los ensayos muestran una correlación alta con los cálculos teóricos.

Mientras que (Maki, 2006) expone los resultados de la evaluación de la interacción suelo estructura de una pila de concreto reforzado usando un modelo de elementos finitos con reducidos grados de libertad, empleando la teoría de fibras para el análisis de vigas.

El artículo (Bárcena, 2007) analiza diferentes estructuras de edificios localizados en el valle de México cimentados sobre suelos blandos, considerando los efectos de considerar ISE. Se encontró una alta correlación entre los valores de amortiguamiento con las relaciones de aspecto del edificio (relación altura /ancho).

Un estudio de (Mahsuli, 2009) que analiza la demanda de ductilidad y Resistencia de edificios con cimentaciones profundas teniendo en cuenta los efectos ISE, su principal conclusión es que la fundación profunda puede incrementar la demanda estructural en edificios esbeltos especialmente sobre suelos blandos.

Investigación realizada (Grange et al., 2011) muestra la manera práctica y numérica bajo modelos matemáticos, basados en el método de los elementos finitos para demostrar el comportamiento dinámico de interacción suelo estructura de un viaducto de tres muelles de hormigón armado, la investigación consta de dos etapas, donde la primera se fundamenta en la teoría de viga de Timochenko y las leyes constitutivas. La comparación de los resultados obtenidos y los experimentales muestran el buen comportamiento del método en las dos etapas.

La publicación (Ko, 2010), fundamenta la investigación en el análisis convencional para interpretar el comportamiento sísmico, donde se considera la base rígida de la estructura y no es considerada la

flexibilidad del suelo, lo que conlleva a una estimación errónea de las características de vibración y respuesta sísmica de la estructura, las investigaciones se fundamentó en la recopilación de la información de varias investigaciones en sitio, esta fue analizada bajo modelos matemáticos para evaluar la diferencia que existe entre los modelos considerados convencionalmente (base rígida). Los resultados obtenidos demuestran que los efectos que se obtiene en el análisis convencional cuando se considera la base rígida difieren notablemente con respecto al análisis donde es considerada la flexibilidad del suelo, es decir la introducción de la flexibilidad del terreno tiene influencia considerable sobre los resultados del análisis estructural.

Efectos asociados con la interacción suelo estructura

El efecto de interacción dinámico consiste en un conjunto de efectos cinemáticos e inerciales, el cual se produce en el sistema de cimentación cuando la onda sísmica se propaga en todo el estrato de suelo, la cual puede atenuarse o amplificarse cuando llega al punto donde se encuentra la cimentación y producir un fenómeno de difracción múltiple. (Botero C., 2004).

Una investigación relacionada con analizar el comportamiento de una estación de metro considerando los efectos ISE fue estudiada por (Yu Miao, 2020) logra evidenciar que la respuesta sísmica de la estructura subterránea tiene afectación debido a las edificaciones cercanas .

Mientras que estudios realizados en vulnerabilidad sísmica teniendo en cuenta los efectos de interacción suelo estructura utilizando la interacción inercia y cinemática, demuestran que la estratigrafía y condiciones del sitio afectan el comportamiento sísmico de la estructura (S.T. Karapetrou, 2015).

Las derivas de piso se aumentan al considerar los efectos ISE en una estructura y da beneficios a la estructura utilizan los parámetros del suelo en el análisis y diseño de la estructura en comparación que cuando se realiza la base fija (Álamo GM, 2015).

Se pudo demostrar (AvileS, 2002) que son muy importantes la profundidad de cimentación y empotramiento de la misma, esta consideración aumenta la amortiguación efectiva del sistema

respecto a la amortiguación de la estructura sola, especialmente para edificaciones bajas, realizando el modelo de una estructura tridimensional con base incrustada.

Un gran aporte a la investigación en el tema de ISE fue (Moghaddasi, 2011) el enfoque del documento hace referencia a la importancia que tiene el análisis de estructuras cuando no se consideran los efectos de flexibilidad del suelo y la gran influencia que tienen estas derivaciones sobre la respuesta estructural, el estudio pretende caracterizar y comparar el comportamiento sísmico de estructuras, lineal y no lineal incorporando variaciones del suelo, utilizando historiales de movimientos sísmico. La caracterización de la dinámica entre la interacción suelo estructura bajo la teoría del medio continuo, método eficiente para demostrar la importancia de integrar los efectos de campo libre y campo cercano en condiciones generales, especializado para el problema de estructuras de base rígida circular sobre arena, un conjunto nominal de la dinámica de la distribución de esfuerzos de contacto (Pak, 2011).

Códigos usados en la aplicación de interacción Suelo Estructura

Aunque se han realizado muchas investigaciones sobre ISE, no todos los países tienen incluidos en sus códigos de diseños las pautas para incluir los efectos ISE obligatorios en el análisis estructural. Esto se debe a la falta de investigación y criterios para determinar analíticamente la aplicación de los efectos ISE. En esta sección se mencionan algunos códigos de diseño internacionales que aplican ISE. Por ejemplo, Europa, Japón, Estados Unidos.

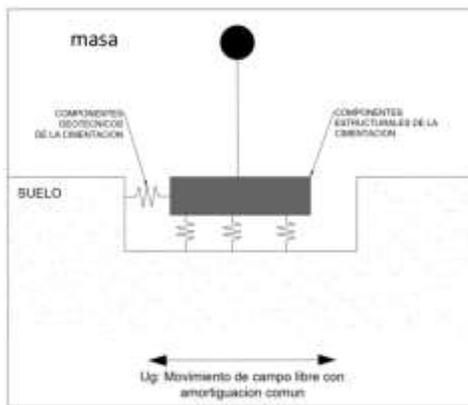
En Europa (Eurocode8, 2004) recomienda que se considere la Interacción suelo estructura dinámica para estructuras de tipo delgadas o que tienen efectos P-Delta de segundo orden significativos y en cimentaciones profundas, entre otras disposiciones.

Mientras que en Japón (JSCE, 2007) recomienda que se debe aplicar ISE en estribos de puentes, muros de contención, estructuras subterráneas, pilotes y cajones y las demás estructuras se dejan a juicio del diseñador aplicar los efectos ISE o no.

Estados Unidos, El modelo de base flexible planteado en el capítulo 8 de la FEMA incluyen los resortes indicados en la figura 3, para la estimación de la flexibilidad y la fuerza de la fundación, en

un modelo estructural para el análisis inelástico. Estas disposiciones normalmente utilizan el movimiento de campo libre como una demanda sísmica con un 5% de amortiguación del valor inicial convencional. Esta aproximación es capaz de modelar tanto los componentes estructurales, como los geotécnicos de la cimentación. El resultado es que la respuesta del sistema estructural general incluye deformaciones elásticas e inelásticas en las partes estructurales y geotécnicas del sistema de fundación. Estas deformaciones se refieren a veces como un efecto inercial de interacción suelo estructura. (440, 2005).

Figura 3 Modelo base flexible



Fuente: FEMA 440, 2005

CONCLUSIONES

Luego de realizar la revisión de la literatura de los efectos Interacción Suelo-Estructura, se logra concluir que cuando se realiza un modelo de base flexible y otro de base fija, parámetros como el amortiguamiento y desplazamiento de la estructura varían considerablemente y que los efectos ISE dependen de las características de la de la estructura y la cimentación de esta.

Existen diferentes formas de modelar una estructura para medir el comportamiento de esta como es por medio de una estructura a escala o por Elementos Finitos.

Algunos códigos de diseño en varios países del mundo como son Japón, Estados Unidos y Europa exigen el uso de ISE en modelos especiales.

La investigación acerca de ISE está avanzada y que a medida de los años se han considerado muchos casos para verificar la incidencia de estos efectos en las estructuras, pero es necesario seguir estudiando el tema para realizar un modelo matemático que permita decidir cuándo usar los efectos ISE y cuando no.

LISTA DE REFERENCIAS

- 440, F. (2005). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Procedures*. Washington.
- 8, E. (2004). *Design of structures for earthquake resistance. Foundations, retaining structures and geotechnical aspects., Part 5*.
- A., G. (2006). *Interacción Suelo-Estructura en el Análisis y Diseño Sísmico de estructuras de mampostería no reforzada*. Mexico.
- Al Heib, M. E. (2020). On the use of 1g physical models for ground movements and soil structure interaction problems. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(1), 197-211.
- Álamo GM, P. L. (2015). Structure–soil–structure interaction effects on the dynamic response of piled structures under obliquely incident seismic shear waves. *Soil Dyn Earth Eng* , 78:142–153.
- Anand, V. &. (2018). *Seismic soil-structure interaction*. Elsevier, Vol. 16, pp. 317-326.
- ASCE, A. S. (2013). *Seismic Evaluation and Upgrade of Existing Buildings*. Reston, VA, EEUU.
- Avilés J., P.-R. L. (2004). *Bases para las Nuevas Disposiciones Reglamentarias sobre Interacción Dinámica Suelo-Estructura*. México: Revista de Ingeniería Sísmica.
- Aviles, J. M. (2002). Effective Periods and damping of building-foundation systems including seismic wave effects. *Engineering Structures*, 553-562.
- Bárcena, A. a. (2007). Influence of dynamic soil–structure interaction on the nonlinear response and seismic reliability of multistorey systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36: 327–346.
- Bielak, J. (1976). *MODAL ANALISYS FOR BUILDING-SOIL INTERACTION*. Pittsburg, PA. EEUU: Carnegie Mellon University.

- Botero C., J. D. (2004). Evaluación de los Efectos Inerciales de Interacción Dinámica Suelo Estructura Para Edificaciones Ubicadas en Medellín. Medellín, Colombia: Revista Universidad EAFIT.
- Chopra, A. K. (2014). DINAMICA DE ESTRUCTURAS. México: Pearson.
- Chopra, A. y. (1985). Simplified earthquake Analysis of structures with foundation Uplift. Journal of Structural Engineering, 906-930.
- Ciampoli, M. &. (1995). Effects of soil-structure interaction on inelastic seismic response of bridge piers. Journal of structural engineering, 806-814.
- E, R. (1992). Diseño de estructuras resistente a sismos. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- EN, B. (2004). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects.
- Espinoza, F. (1999). Determinación de características Dinámicas de la estructura. Cataluña, España.
- Huseyin Cilsalar, C. C. (2020). Seismic performance evaluation of adjacent buildings with consideration of improved soil conditions. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 140.
- Javier Avilés, L. E. (1996). Evaluation of interaction effects on the system period and the system damping due to foundation embedment and layer depth (Vol. 15). Soil Dynamics and Earthquake Engineering.
- JSCE Concrete Committee. (2007). Standard Specifications for Concrete Structures-2007 “Design”. Japanese Society of Civil Engineering (JSCE), JSCE Guidelines for Concrete.
- JSCE. (2007). Standard Specifications for Concrete Structures - JSCE Guidelines for Concrete. Japanese Society of Civil Engineering (JSCE).
- Kayna, A. M. (1991). Dynamics of piles and pile groups in layered soil media. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 386-401.

- Khalil L., S. M. (2005). Influence of the Soil-structure Interaction on the fundamental period of building. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.
- Ko, Y.-Y. a.-H. (2010). Soil–structure interaction effects observed in the in situ forced vibration and pushover tests of school buildings in Taiwan and their modeling considering the foundation flexibility. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40:93-105.
- Luco, J. E. (2005). Identification of Structural and soil properties from vibration tests of the Hualien containment model. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*., 34: 21– 48.
- Mahsuli, M. a. (2009). The effect of foundation embedment on inelastic response of structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38: 423–437.
- Maki, T. M. (2006). RC pile–soil interaction analysis using a 3D-finite element method with fiber theory-based beam elements. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35: 1587–1607.
- Marwan Al Heib, F. E.-L. (2020). On the use of 1g physical models for ground movements and soil-structure interaction problems. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12, 197-211.
- Meek, A. S. (1974). DYNAMIC BEHAVIOUR OF BUILDING-FOUNDATION SYSTEMS. *The Journal of the International Association for Earthquake Engineering*.
- Moghaddasi, M. C. (2011). Probabilistic evaluation of soil–foundation–structure interaction effects on seismic structural response. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40: 135–154.
- Pak, R. Y. (2011). A fundamental dual-zone continuum theory for dynamic soil–structure interaction. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40: 1011–1025.
- Paul C. Jennings, J. B. (1973). DYNAMICS OF BUILDING-SOIL INTERACTION. Pasadena, California: Bulletin of tile Seismological Society of America.

- S.T. Karapetrou, S. F. (2015). Seismic vulnerability assessment of high-rise non-ductile RC buildings considering soil–structure interaction effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Pages 42-57.
- SISMICA, A. C. (2010). Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente, NSR10. Bogotá: AIS.
- Soriano, A. (1989). *Interacción Suelo-Estructura, Modificación del Movimiento*. Madrid, España.
- Van Nguyen, Q. F. (2017). Influence of size and load-bearing mechanism of piles on seismic performance of buildings considering soil-pile-structure interaction. *International Journal of Geomechanics*.
- Yu Miao, Y. Z. (2020). Seismic response of a subway station in soft soil considering the structure-soil-structure interaction. *Tunnelling and Underground Space Technology*.