



Síntesis de investigaciones sobre la interacción Suelo-Estructura en Ingeniería Civil
Revisión Literaria

Emily Andreina Pineda Salas

Yesica Milena Giraldo Henao

Monografía presentada Para optar al título de Especialista en Análisis y Diseño de Estructuras

Asesor

Cristian Camilo Londoño Piedrahita
Ingeniero Civil, Ingeniero Especialista.

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita

(Pineda Salas & Giraldo Henao, 2024)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Pineda Salas & Giraldo Henao.(2024). *Síntesis de investigaciones sobre la interacción Suelo-Estructura en Ingeniería Civil Una revisión Literaria* [Trabajo de grado especialización. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras, Cohorte XI.



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

1. Dedicatoria.....	6
2. Resumen.....	7
3. Abstract	8
4. Introducción	9
5. Planteamiento del problema.....	10
6. Justificación	11
7. Objetivos:.....	12
7.1. Objetivo General	12
7.2. Objetivos Específicos	12
8. Métodos de Investigación	13
9. Marco teórico	14
9.1. Análisis estructural	14
9.2. En relación con la configuración estructural:.....	14
• Análisis Estático:.....	14
• Análisis Dinámico:.....	14
• Análisis Lineal:	14
• Análisis No Lineal:.....	14
9.3. Interacción Suelo - Estructura	17
• Movimientos traslacionales.....	22
• Desplazamientos.....	22
9.4. Promedio de losa base	23
9.5. Efectos de incrustación.....	23
9.6. Cimentación y flexibilidad del suelo.....	23
9.7. Alargamiento del período.....	24

9.8.	Consideraciones sobre Períodos Largos:.....	25
9.9.	Amortiguación de la base	25
9.10.	Modelos para representar ISE	26
9.11.	Método directo:	27
9.12.	Método de la subestructura:	27
9.13.	Método de Winkler.....	28
9.14.	Curva PY:	28
9.15.	Enfoque de continuo elástico	29
9.16.	Métodos numéricos:	29
9.17.	Método de elementos finitos (MEF) (8.4.6.1).....	29
9.18.	El método de elementos de contorno (BEM) (8.4.6.2)	30
9.19.	El método de elementos espectrales (SEM) (8.4.6.3)	30
9.20.	Investigaciones realizadas con relación a la interacción entre el suelo y la estructura: .	31
9.21.	Detección de la relevancia del efecto geotécnico sobre la estructura en eventos sísmicos (Ohsaki, 1966):.....	32
10.	Conclusiones	37
11.	Recomendaciones:.....	39
12.	Referencias	40

Lista de figuras

Figura 1 Movimiento en campo libre y su relación con la interacción cinemática y la interacción inercial.....	17
Figura 2 Diferencias de la onda de propagación con y sin estructura.....	19
Figura 3 Respuesta dinámica de una edificación sobre una roca y sobre un suelo blando.....	21
Figura 4 Diferencias del movimiento en distintos puntos de un sistema suelo-cimentación-estructura.	21
Figura 5 Modelado de la Flexibilidad del Suelo	24
Figura 6 Ejemplo de una cimentación y superestructura donde no se permite la amortiguación de la cimentación porque las zapatas no conectadas están demasiado cerca.....	25
Figura 7 Síntesis de modelos de análisis con ISE y sin ISE	26
Figura 8 Método directo de ISE mediante el uso de elementos finitos.....	27
Figura 9 Modelo de la fundación de Winkler	28
Figura 10 Ejemplo análisis curva PY	29
Figura 11 Año de investigación	31

1. Dedicatoria

Dedico esta monografía a nuestros padres, quienes con su apoyo incondicional y sabios consejos han sido nuestra mayor inspiración a lo largo de mi formación académica. A mis profesores, por motivarnos a explorar y profundizar en el campo de la ingeniería estructural, inculcándome el valor del conocimiento y la importancia de la investigación. Y finalmente, a mis compañeros y amigos, por su compañerismo y apoyo constante, quienes me han acompañado en este viaje de aprendizaje y crecimiento personal. Este trabajo es el reflejo del esfuerzo compartido y del compromiso por contribuir al desarrollo de soluciones estructurales más seguras y eficientes.

2. Resumen

Este trabajo se centra en la interacción suelo-estructura y su relevancia en el diseño estructural, destacando la importancia de considerar esta dinámica para evitar daños en las estructuras, especialmente durante eventos sísmicos. A través de una revisión crítica de la literatura, se identifican las causas y consecuencias de no integrar adecuadamente la ISE en los diseños, lo que puede llevar a una estimación incorrecta de desplazamientos y fuerzas internas, aumentando el riesgo de fallos estructurales. El estudio ha demostrado la importancia de consolidar el conocimiento disperso a través de diversas disciplinas para obtener una visión integral sobre el tema. La síntesis de información clave ha permitido identificar patrones y tendencias que anteriormente estaban fragmentados. Como resultado, se han logrado ofrecer recomendaciones prácticas basadas en un análisis fundamentado. Asimismo, se plantean áreas de investigación futura para abordar las deficiencias actuales más notorias, como es el caso de análisis y comportamiento de muros estructurales ante los efectos interacción suelo estructura.

3. Abstract

This study focuses on soil-structure interaction (SSI) and its significance in structural design, emphasizing the importance of considering this dynamic to prevent damage to structures, particularly during seismic events. Through a critical review of the literature, the causes and consequences of failing to adequately integrate SSI into designs are identified. This oversight can lead to incorrect estimations of displacements and internal forces, increasing the risk of structural failures.

The research highlights the importance of consolidating scattered knowledge across various disciplines to gain a comprehensive understanding of the subject. The synthesis of key information has allowed the identification of patterns and trends that were previously fragmented. As a result, practical recommendations based on well-founded analysis have been provided. Furthermore, areas for future research are proposed to address the most prominent current deficiencies, such as the analysis and behavior of structural walls under the effects of soil-structure interaction.

4. Introducción

Se conoce como interacción suelo-estructura (ISE) la respuesta de la edificación a través de su comportamiento cinemático e inercial ante sollicitaciones dinámicas en el terreno, en relación con las condiciones geológicas y geotécnicas del sitio, se considera como elemento importante en la seguridad de las estructuras. Por consiguiente, el presente trabajo realiza una síntesis sobre la interacción suelo-estructura y cómo puede atenderse mediante ciertos parámetros a la hora de realizar diseño estructural. Se identifican las causas y consecuencias que se generan por no tomar en cuenta estos factores y cómo afectan los diferentes diseños estructurales de no ser considerados. Adicionalmente, se plantean diferentes recomendaciones para tener en cuenta esta dinámica suelo-estructura lo que resulta es esencial para garantizar la seguridad, durabilidad y funcionalidad de las estructuras a lo largo de su vida útil.

5. Planteamiento del problema

Muchas estructuras han sufrido daños significativos debido a la falta de consideración adecuada de la interacción suelo-estructura. El comportamiento dinámico de una estructura durante un sismo está influenciado no solo por las propiedades de la estructura en sí, sino también por las propiedades del suelo sobre el que se apoya. La falta de análisis adecuado de la ISE puede llevar a la subestimación de desplazamientos, fuerzas internas y momentos en la estructura, aumentando el riesgo de fallos estructurales durante un terremoto. Por lo tanto, es necesario desarrollar estudios de investigación como este que abordan la importancia y los desafíos asociados con la interacción suelo-estructura.

6. Justificación

El campo de la interacción suelo-estructura abarca una amplia gama de temas, desde aspectos teóricos hasta aplicaciones prácticas. Sin embargo, la dispersión de conocimientos en diferentes disciplinas y enfoques ha generado una falta de síntesis que dificulta su aplicación efectiva en el diseño y la ingeniería estructural. Esta revisión bibliográfica se justifica por la necesidad de sintetizar la información disponible en la literatura, integrando los hallazgos más relevantes en un documento cohesivo que facilite su comprensión y aplicación por parte de profesionales e investigadores.

7. Objetivos:

7.1. Objetivo General

Realizar una síntesis crítica de la literatura existente sobre la interacción suelo-estructura, con el fin de consolidar el conocimiento actual, identificar tendencias emergentes y destacar áreas de investigación futura en el campo de la ingeniería civil y geotécnica.

7.2. Objetivos Específicos

-Revisar y sintetizar los estudios de la ISE enfocados en el análisis y respuesta a las condiciones geotécnicas.

-Compilar y analizar los métodos y modelos utilizados para evaluar la ISE, comparando sus ventajas, limitaciones y aplicaciones en diferentes contextos geotécnicos y estructurales.

-Identificar las principales finalidades en la investigación actual sobre la interacción suelo-estructura, destacando áreas de estudio que puedan contribuir al avance del conocimiento en este campo.

8. Métodos de Investigación

Varios procedimientos fueron llevados a cabo para cumplir con los objetivos de la investigación. Entre estos, se realizó una revisión del estado del arte que valoró y analizó los artículos publicados en la bibliografía nacional y mundial acerca de la literatura existente sobre la ISE. C. Para este fin, y mediante una fase exploratoria, se llevó a cabo una búsqueda a través de los portales de Scimedirect, Scielo, Google scholar, ResearchGate. Considerando estas bases de datos como fuentes completas de recopilación de información, suficiente y necesaria para el desarrollo de la investigación. Además de fuentes como FEMA P-2091.

Posteriormente, en la fase descriptiva, se seleccionaron los artículos más relevantes a través de revisiones técnicas, sistemáticas y metaanálisis. Se tuvieron en cuenta las características, ventajas y limitaciones de la información recolectada. Además, se categorizó y ordenó la información con el fin de mejorar su interpretación, agrupando por una parte el marco teórico en análisis estructural, interacción suelo estructura, efectos del suelo en las estructuras, modelos para representar la ISE, formas de modelado e investigaciones realizadas en ISE.

Seguidamente, en la fase interpretativa, se analizaron los artículos e investigaciones más relevantes, sistematizando hallazgos, conceptos, eficiencias, dificultades y recomendaciones presentados por los autores de las investigaciones sobre ISE.

9. Marco teórico

9.1. Análisis estructural

El análisis estructural es un proceso que permite estudiar el comportamiento de una estructura ante solicitaciones internas y externas, evaluando criterios como resistencia, rigidez, estabilidad, durabilidad y seguridad. En la ingeniería estructural, esta herramienta es fundamental para los proyectos de diseño, ya que la predicción del comportamiento estructural es esencial.

El análisis se aborda como un proceso iterativo, necesario para obtener respuestas estructurales precisas y evaluar la compatibilidad entre la estructura y el suelo. Este proceso determina si una estructura cumple con los requisitos de seguridad y desempeño establecidos por los códigos de diseño, considerando específicamente las interacciones entre la estructura y su entorno.

Inicialmente, se plantea un diseño preliminar y se estiman las cargas que se espera que actúen sobre la estructura. En esta fase, se aplican diversos métodos de análisis para evaluar cómo estas cargas afectan tanto a la estructura como al suelo. Los métodos más comunes incluyen:

9.2. En relación con la configuración estructural:

- **Análisis Estático:** Se utiliza para calcular las respuestas estructurales bajo cargas estáticas, como el peso propio de la estructura o aquellas cargas que permanecen constantes en el tiempo.
- **Análisis Dinámico:** Se emplea para evaluar las respuestas de la estructura bajo cargas dinámicas que varían con el tiempo, como las inducidas por sismos, impactos o vientos.
- En relación con las condiciones de carga y el comportamiento esperado de la estructura y su material:
- **Análisis Lineal:** Asume que la relación entre las fuerzas aplicadas y las respuestas de la estructura (desplazamientos, tensiones y deformaciones) es directamente proporcional; es decir, a mayor carga, mayor desplazamiento. En este caso, se considera que los materiales se comportan de manera lineal, deformándose y volviendo a su posición original.
- **Análisis No Lineal:** Considera relaciones no proporcionales entre las fuerzas aplicadas y las respuestas de la estructura. En este enfoque, una duplicación de la

carga no necesariamente resulta en una duplicación de desplazamientos o tensiones, lo que lo hace adecuado para grandes deformaciones y el comportamiento plástico de los materiales.

Existen diversas combinaciones, como el análisis estático lineal o dinámico no lineal, que son más avanzadas y se pueden resumir en la Tabla 1.

Análisis	Estático	Dinámico
Lineal	Fuerza Horizontal Equivalente	Vibración
	Carga Gravitacional	Modal espectral
No lineal	Pushover	Tiempo- Historia
	Pruebas de carga	Explosión

Tabla 1. Clasificación y nomenclatura general de los análisis estructurales.

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, el enfoque de diseño más sencillo ignora la interacción del cimiento con el suelo circundante. Según este enfoque, primero se estiman las deformaciones del terreno en campo libre y luego se diseña la cimentación para acomodarse a estas deformaciones. Este resultado es satisfactorio cuando el suelo es mucho más rígido que la cimentación. Se presentan las principales diferencias entre los análisis de edificaciones desplantadas sobre una base indeformable y deformable o dicho en otras palabras, estructuras apoyadas sobre suelos con alta rigidez y sobre suelos con baja rigidez.

Base indeformable	Base deformable
No hay modificaciones del movimiento en los distintos puntos del terreno.	Existe una modificación del movimiento en los distintos puntos del terreno (Efectos de sitio).
No hay desplazamiento relativo de la cimentación respecto al terreno	Existe una modificación del movimiento de campo libre, debido a la presencia de la cimentación (interacción cinemática).
No hay componente de movimiento de cuerpo rígido de la superestructura (cabeceo y traslación).	Existe un desplazamiento relativo de la cimentación respecto al terreno producido por las fuerzas de inercia de la superestructura (interacción inercial).

Tabla 2 Diferencia entre las edificaciones con base indeformable y base deformable

Fuente: Fernández S., 2013

En caso contrario, cuando el suelo no es tan rígido, es necesario considerar los efectos de interacción cinemática, ya que pueden afectar considerablemente las deformaciones circundantes. Estos efectos son causados por la difracción de las ondas incidentes por la cimentación y, hasta la fecha, han sido poco estudiados en comparación con los efectos de interacción inercial debidos a la vibración de la estructura. Para una mejor definición de los efectos, tenemos entonces:

Interacción Cinemática: Se determina la modificación del movimiento por la presencia de la cimentación al paso de las ondas sísmicas.

Interacción Inercial: Se determinan los cambios en el periodo, amortiguamiento y ductilidad estructurales, debidos a la flexibilidad del suelo de apoyo, mediante la construcción de modelos integrales suelo-cimentación-estructura. Este tipo de análisis permite determinar con mayor detalle el nivel de aceleración espectral al que estará expuesta una estructura.

Al relacionar los diferentes análisis con el estudio de la interacción suelo-estructura, suelen utilizarse de la siguiente manera:

ISE	Estático	Dinámico
Lineal	Coeficiente Balasto	no común
No lineal	Curva PY	Fuerza Horizontal EQ. Incluyendo curva PY

Tabla 3. Clasificación general de los análisis estructurales con ISE.

Fuente. Elaboración propia

Esta información de análisis en relación a ISE será profundizado en los siguientes capítulos.

9.3. Interacción Suelo - Estructura

Los sismos se originan al liberarse energía en el interior de la Tierra, un proceso que ocurre debido al movimiento de las placas tectónicas, provocando rupturas y perturbaciones. Pero, ¿qué sucede con el subsuelo en el momento en que se desarrollan estos movimientos?

La respuesta de un edificio ante las solicitaciones impuestas por un sismo dependerá de la interacción entre la estructura, la cimentación y el medio que la rodea. Durante un evento sísmico, las ondas generadas en la zona de ruptura se propagan a través del suelo y se transmiten hacia la estructura, generando su desplazamiento. Además, la presencia de la estructura modifica el comportamiento del suelo circundante. Esta influencia mutua en el comportamiento estático o dinámico de estos elementos se conoce como interacción suelo-estructura (Wong, 1975).

Los efectos estáticos se generan a partir de fuerzas gravitatorias, mientras que los efectos dinámicos provienen de los movimientos del terreno producidos por eventos sísmicos.

El movimiento en la superficie del suelo, en ausencia de una estructura y sus cimientos, se denomina movimiento de campo libre. Por lo general, este movimiento es mayor que el movimiento de entrada de los cimientos que efectivamente excita la estructura. La transformación del movimiento de campo libre en el movimiento de entrada fundamental se debe a la interacción cinemática. El movimiento de entrada en la base puede considerarse como el movimiento aplicado a los extremos de los resortes horizontales de la base; este difiere del movimiento real de la cimentación debido a la respuesta inercial de la estructura y a las deflexiones que dicha respuesta produce en los resortes de la cimentación. Esta respuesta se conoce como interacción inercial, y se puede observar con mayor claridad en la figura siguiente:

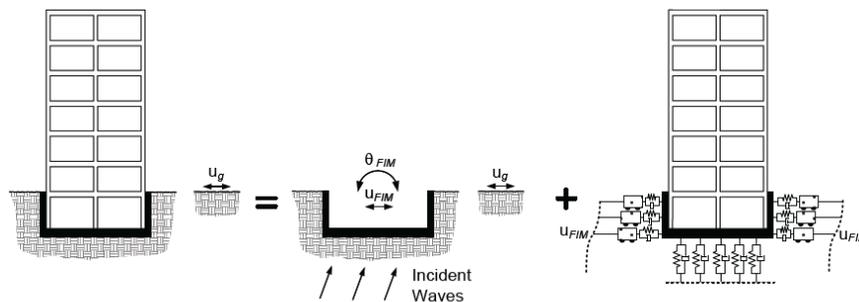
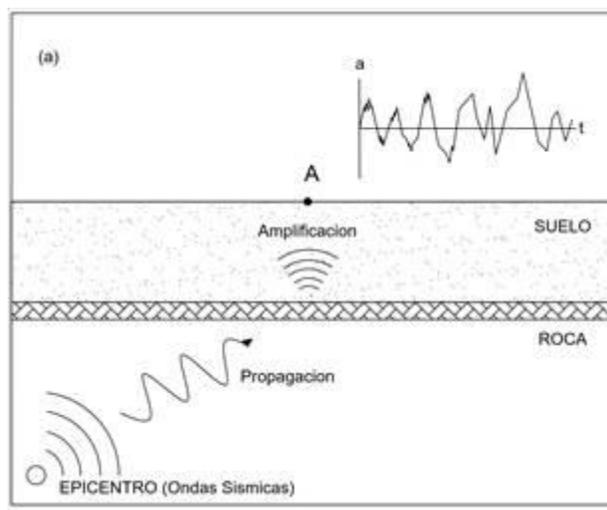


Figura 1 Movimiento en campo libre y su relación con la interacción cinemática y la interacción inercial

Por lo tanto, la interacción inercial es la interacción dinámica entre la estructura, su cimentación y el suelo circundante, causada por el movimiento de entrada de la cimentación.

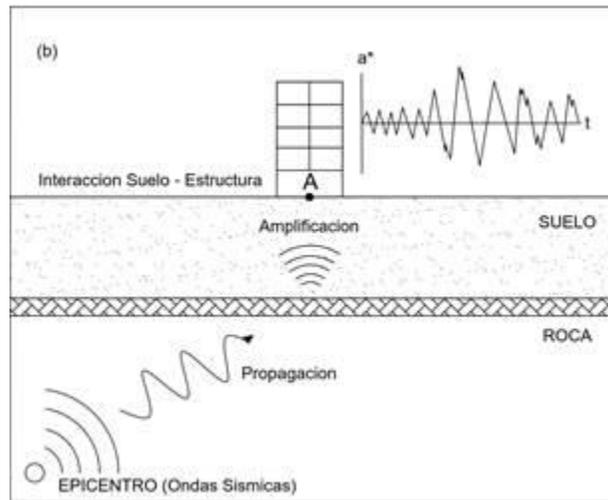
Para lograr una mayor comprensión de la interacción suelo-estructura, es fundamental considerar cómo se propagan las ondas en el suelo, las características dinámicas del mismo y la dinámica de la estructura. Según Soriano (1989), el efecto de interacción suelo-estructura se define como la manera en que la presencia de la estructura afecta las características de movimiento del terreno donde está expuesta. Esto se puede analizar desde dos puntos de vista: uno que considera el comportamiento del suelo con la estructura presente y otro en el que se evalúa el comportamiento del suelo sin la estructura (Espinoza, 1999).

La figura (a) ilustra el comportamiento dinámico de la transmisión de ondas sísmicas desde un punto denominado epicentro hasta el lugar donde se encuentra la edificación. La figura (b) muestra cómo cambia la aceleración espectral al estar presente la estructura en el sitio.



(a) Sin presencia de una estructura

Fuente: Soriano 1989



(b) Diferencias en la propagación de las ondas sísmicas.

Fuente: Soriano 1989

Figura 2 Diferencias de la onda de propagación con y sin estructura

En una investigación reciente realizada por Huseyin Cilsalar (2020), se concluye que los efectos de interacción suelo-estructura (ISE) tienen una gran incidencia en la respuesta sísmica de la estructura, especialmente cuando se consideran las propiedades del suelo en el que está cimentada.

Por otro lado, Khalil (2005) evidencia que es beneficioso considerar los efectos ISE en un sistema estructural con base flexible bajo cargas sísmicas, en comparación con un sistema con base empotrada. Esto se debe a que los efectos ISE tienen una influencia directa en el período fundamental y el amortiguamiento del sistema.

Es fundamental incluir los efectos ISE para lograr una mejor respuesta sísmica de la estructura. Se ha demostrado que las características del sitio donde se encuentra la edificación, su cimentación y el sistema estructural inciden en el comportamiento dinámico. Además, los efectos locales observados 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 las estructuras apoyadas en suelo flexible, que pueden experimentar desprendimientos, presentan efectos beneficiosos, los cuales dependen de los parámetros del sistema y de las características de la fuente de excitación.

Se han llevado a cabo numerosas investigaciones sobre los parámetros que afectan la ISE, incluyendo la geometría de la edificación, la cimentación, el módulo del suelo, el perfil de velocidad de onda de corte y la relación entre la estructura y la rigidez del suelo (Ciampoli, 1995).

Asimismo, investigaciones realizadas por Van Nguyen (2017) demostraron que las características de la cimentación, tanto de zapatas superficiales como de pilotes, afectan la respuesta sísmica en relación con los efectos ISE.

Efectos sísmicos en el suelo

Las propiedades dinámicas del suelo y de la estructura se activan con la excitación sísmica. Sin embargo, surge la pregunta: ¿cómo influye el diseño de una cimentación en esta interacción? ¿Cómo responden una cimentación rígida y una cimentación flexible ante los efectos de interacción suelo-estructura (ISE)? Para responder a estas preguntas, a continuación, se presenta un resumen del trabajo realizado por el Dr. Luciano Roberto Fernández Sola, presentado en mayo de 2013.

Para identificar los principales efectos de considerar una base de edificación como deformable, primero debemos analizar cualitativamente las diferencias fundamentales entre estos modelos y aquellos que consideran bases indeformables. Consideremos dos estructuras: una situada sobre un lecho rocoso (base indeformable) y otra sobre un suelo de rigidez relativamente baja (base deformable), tal como se muestra en la ilustración 3.

En el caso de la estructura con base indeformable, queda claro que los movimientos en toda la cimentación son uniformes (puntos A y B). Por lo tanto, la excitación en la base de la estructura (punto B) está definida por el movimiento en la superficie (punto A), y esta excitación se considera que varía muy poco en todo el lecho rocoso. Este movimiento está determinado por las características de la fuente sísmica (mecanismo de ruptura y magnitud del sismo) y por el decaimiento del movimiento con la distancia, que se describe mediante una ley de atenuación.

Dada esta excitación, la respuesta de la superestructura dependerá exclusivamente de sus propiedades (masa, rigidez y amortiguamiento), así como de los desplazamientos permitidos por su deformabilidad e inercia.

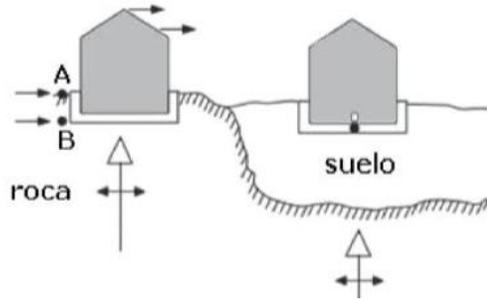


Figura 3 Respuesta dinámica de una edificación sobre una roca y sobre un suelo blando.

Fuente: Fernández S., 2013

Para describir la respuesta dinámica de la cimentación con base deformable, es necesario descomponer el problema en más partes. Para ello consideremos la ilustración 4

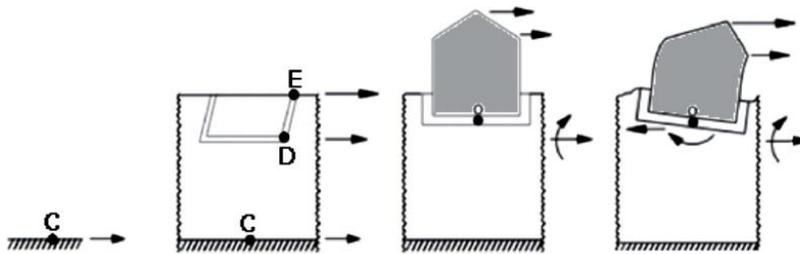


Figura 4 Diferencias del movimiento en distintos puntos de un sistema suelo-cimentación-estructura.

Fuente: Fernández S, 2013

El movimiento en el punto C corresponde al movimiento en el lecho rocoso definido anteriormente. La primera diferencia surge porque el suelo que descansa sobre el lecho rocoso tiene propiedades distintas, lo que se traduce en una variación del movimiento entre los puntos C, D y E, incluso en ausencia de la cimentación.

En el caso de una base indeformable, el movimiento en estos tres puntos sería el mismo. Esta variación generalmente resulta en una amplificación del movimiento y en un filtrado de su contenido de frecuencias; a estas modificaciones se les denomina “efectos de sitio”.

Cuando se introduce la cimentación, que tiene una rigidez mayor que la del suelo, el campo de desplazamientos impuesto en el terreno libre, en ausencia de la cimentación, se verá modificado. Esto produce, en general, una reducción en las amplitudes de los movimientos de

alta frecuencia e introduce una excitación rotacional en la base de la cimentación (punto O), ya que los puntos D y E no pueden moverse independientemente entre sí. A las modificaciones del movimiento causadas por la presencia de un elemento de mayor rigidez se les denomina “interacción cinemática”, dado que en esta fase del fenómeno solo interviene la difracción de ondas producida por el contraste de rigideces entre el terreno y la cimentación.

Si la estructura se somete a traslaciones modificadas, tanto por los efectos de sitio como por la rigidez de la cimentación y las rotaciones producidas por el movimiento diferencial entre los puntos D y E (ver ilustración 4), los movimientos que experimenta el sistema estarán compuestos por dos partes fundamentales:

- Movimientos traslacionales originados por las fuerzas de inercia de la superestructura en el sistema deformable suelo-cimentación.
- Desplazamientos originados por los giros impuestos en el sistema deformable suelo-cimentación, provocados por los momentos de volteo causados por las fuerzas de inercia de la superestructura.

Estos dos movimientos corresponden a un movimiento de cuerpo rígido de la superestructura respecto al terreno. Finalmente, los desplazamientos permitidos por las propiedades y la deformabilidad de la propia estructura (deformaciones producidas por las fuerzas de inercia desarrolladas por la superestructura sobre el sistema suelo-cimentación) se conocen como interacción inercial.

En la guía de FEMA P-2091 (2020)- Guía práctica para ISE , se presenta información detallada sobre la interacción suelo-estructura (ISE), resaltando su importancia en la ingeniería estructural. Este documento contiene información fundamental para comprender cómo la flexibilidad del suelo influye en la respuesta dinámica de las estructuras durante eventos sísmicos. Al considerar la importancia de la interacción suelo estructura, se pueden optimizar los diseños de cimentaciones, garantizando que sean capaces de soportar las fuerzas generadas por movimientos sísmicos, lo que reduce el riesgo de daños estructurales. Además, una mejor comprensión de la ISE permite desarrollar estrategias de mitigación efectivas que minimicen las vibraciones adversas, especialmente en áreas con suelos de baja rigidez, resultando en edificaciones más seguras y resilientes frente a sismos. A continuación, se explorarán subtemas

relacionados con los efectos de la flexibilidad del suelo, la optimización de diseños de cimentación y las estrategias de mitigación en contextos sísmicos.

9.4. Promedio de losa base

Cuando el edificio presenta un área significativa en su base, es necesario considerar el efecto del suelo, debido a que por causa de los movimientos sísmicos las ondas presentan incoherencias, es decir, que varía el tiempo de llegada de las ondas además que puede presentarse diferencias en las propiedades del suelo, lo que provoca que partes del edificio se desplacen en direcciones opuestas. Este fenómeno es más pronunciado en períodos cortos, permitiendo que edificios rígidos con cimientos conectados experimenten menores fuerzas sísmicas en sus superestructuras.

9.5. Efectos de incrustación

Se relaciona con la reducción de los movimientos del suelo con la profundidad. La fundación modifica el movimiento del campo libre, que se asume desarrollado en la superficie del suelo, y reduce la entrada de movimiento en la fundación, lo que disminuye las demandas sobre la estructura, evidenciado por una reducción en las ordenadas del espectro de respuesta. A mayor profundidad de embebido, mayor será la reducción de los valores del espectro de respuesta.

9.6. Cimentación y flexibilidad del suelo

En un diseño tradicional o convencional, se considera que la estructura está fija (empotrado) al suelo, lo cual es una suposición, además de asumir en ocasiones que el terreno es rígido. Estos criterios de análisis no son del todo válidos, pues resulta importante tener presente la flexibilidad del sistema de fundación, lo cual puede afectar significativamente las propiedades dinámicas del edificio. Según ASCE/SEI 7-16, los modelos analíticos deben incorporar la flexibilidad vertical, horizontal y rotacional de la fundación y el suelo.

La flexibilidad de la fundación puede determinarse mediante métodos convencionales, aunque ASCE/SEI 7-16 no ofrece guías específicas para calcular la rigidez del suelo. La flexibilidad del suelo se modela mediante resortes.

Se describen dos técnicas para evaluar la flexibilidad de la fundación: una propuesta por Pais y Kausel (1988) y otra por Gazetas (1991), que modelan seis grados de libertad de flexibilidad. Sin embargo, estas técnicas no son adecuadas para situaciones donde los elementos

estructurales también son flexibles. ASCE/SEI 41-17 proporciona métodos adicionales para considerar la flexibilidad de los elementos de fundación.

9.7. Alargamiento del período

Considerar esta flexibilidad en el análisis lateral produce períodos fundamentales más largos y generalmente incrementa la participación de masa en los modos fundamentales. El alargamiento del período siempre aumenta la respuesta de desplazamiento y puede afectar la respuesta de aceleración, ya sea aumentando o disminuyendo esta última.

Los efectos del alargamiento del período en las respuestas de aceleración y desplazamiento son consecuencia de la forma básica de los espectros de aceleración y desplazamiento. La ilustración 5 ilustra un espectro de diseño de aceleración y el espectro de desplazamiento correspondiente. A medida que aumenta el período, la aceleración espectral alcanza un valor máximo (aproximadamente a 0.5 segundos) y luego disminuye, mientras que el desplazamiento espectral generalmente aumenta. Esto resulta en cambios correlacionados en las respuestas de aceleración y desplazamiento. Se muestran los efectos posibles para las estructuras "X" e "Y", donde para la estructura X, el aumento del período incrementa tanto la aceleración como el desplazamiento espectral, mientras que para la estructura Y, el aumento del período disminuye la aceleración espectral y aumenta el desplazamiento.

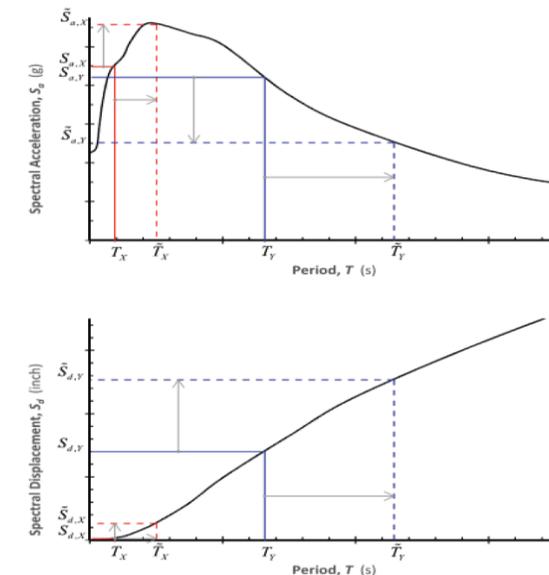


Figura 5 Modelado de la Flexibilidad del Suelo

Fuente: FEMA P-2091, 2018

9.8. Consideraciones sobre Períodos Largos:

Aumento del período fundamental incrementa el grado de participación de la masa en los modos fundamentales. Un período más largo siempre aumenta la respuesta de desplazamiento y puede aumentar o disminuir la respuesta de aceleración. Ocurren también efectos del alargamiento del período en la respuesta de aceleración y desplazamiento son consecuencia de la forma básica de los espectros de aceleración y desplazamiento.

9.9. Amortiguación de la base

Una de las principales hipótesis que se consideran, es que los amortiguamientos del sistema son proporcionales a su masa y a su rigidez, lo cual hace que su respuesta presente modos clásicos de vibración. Aunque la amortiguación de la fundación es menos común en la práctica que otros efectos de interacción suelo-estructura, como el alargamiento del período, NIST (2012) y Givens et al. (2016) ofrecen un marco analítico que distingue claramente entre las contribuciones de la amortiguación del suelo y la radiación. La sección 19.3 de ASCE/SEI 7-16 proporciona disposiciones para ambas componentes. La amortiguación de la fundación puede combinarse con la amortiguación viscosa efectiva en la superestructura, aumentando la amortiguación total y reduciendo las demandas espectrales.

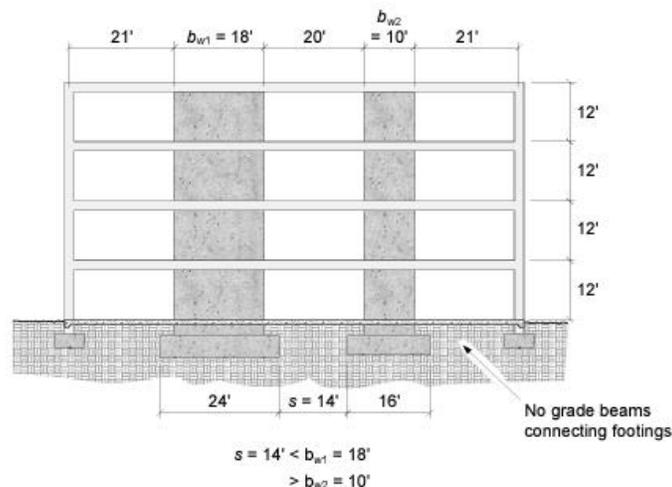


Figura 6 Ejemplo de una cimentación y superestructura donde no se permite la amortiguación de la cimentación porque las zapatas no conectadas están demasiado cerca.

Fuente: FEMA P-2091, 2018

9.10. Modelos para representar ISE

En la actualidad, la interacción suelo-estructura (ISE) se reconoce como un elemento esencial en el análisis estructural, y se han desarrollado diversos modelos que permiten integrar sus propiedades más relevantes en los procesos de diseño y evaluación. No obstante, es crucial entender las limitaciones inherentes a estos métodos, ya que la selección del enfoque adecuado es determinante para la obtención de resultados precisos y confiables. Cada caso de estudio presenta características específicas que influyen en la interacción entre la estructura y el medio circundante, lo que enfatiza la necesidad de emplear el modelo más apropiado. En este contexto, se procederá a analizar las diferentes técnicas disponibles en la ilustración 8, teniendo en cuenta que la manera correcta implementación puede optimizar la seguridad y el rendimiento de las edificaciones frente a sollicitaciones externas.

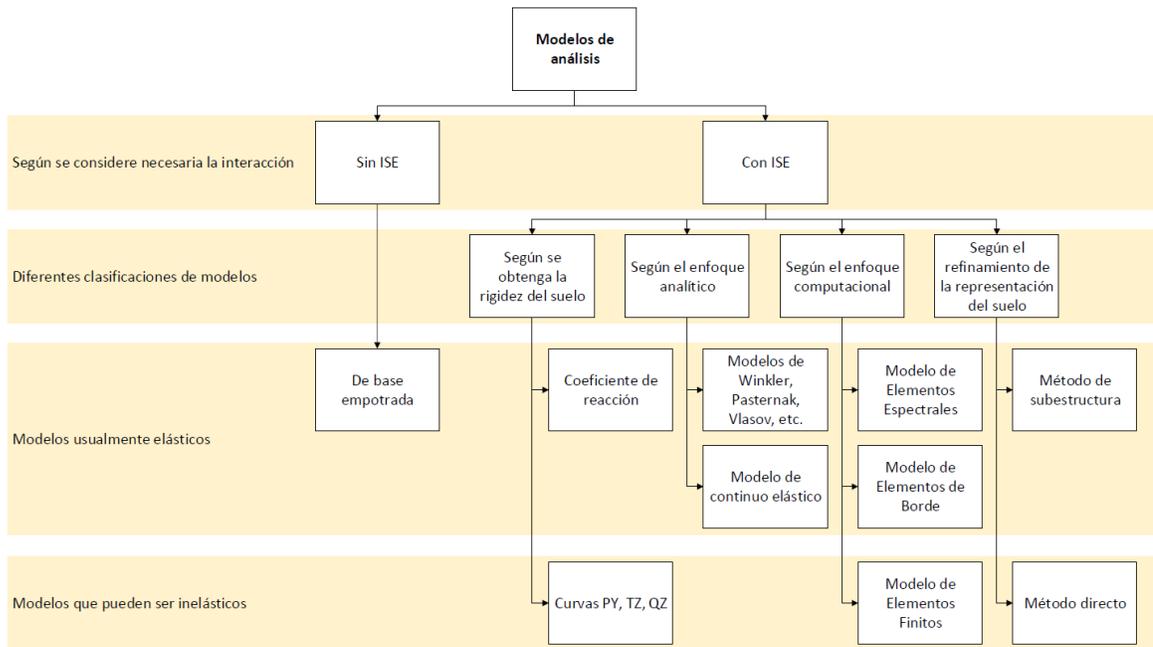


Figura 7 Síntesis de modelos de análisis con ISE y sin ISE

Fuente: diseño propio

En el análisis de la interacción suelo-estructura (ISE), es crucial examinar los diversos métodos disponibles para evaluar esta relación compleja. Awchat et al. (2022) ofrecen una revisión exhaustiva de estos enfoques, clasificándolos según su aplicabilidad y efectos incorporados. A continuación, se detallarán los métodos referenciados:

9.11. Método directo:

El método directo de análisis de la interacción suelo-estructura (SSI) incluye el suelo como parte del sistema a modelar. En este enfoque, el suelo se representa como un continuo mediante elementos finitos, abarcando componentes como la fundación y otras estructuras, junto con elementos de transmisión de límites y de interfaz. Los límites de transmisión se sitúan en el borde de la malla, mientras que los elementos de interfaz se encuentran al final de la fundación.

Sin embargo, incorporar la interacción cinemática en este método es complicado, ya que requiere describir el movimiento de entrada variable en tres dimensiones. Además, el cálculo en el método directo se vuelve complejo cuando se trata de estructuras intrincadas o de propiedades no lineales del suelo y la estructura.

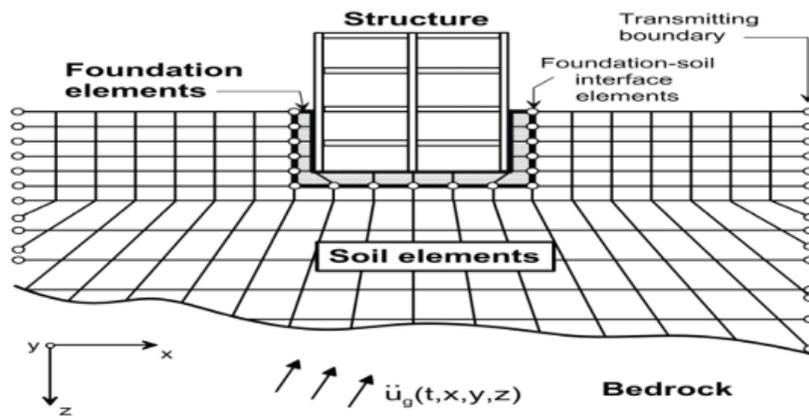


Figura 8 Método directo de ISE mediante el uso de elementos finitos

Fuente: Awchat et al.(2022)

9.12. Método de la subestructura:

El enfoque de subestructura descompone el problema de interacción suelo-estructura (SSI) en partes más manejables para facilitar la solución. Utiliza funciones de transferencia para evaluar los componentes cinemáticos y funciones de impedancia para analizar los componentes de inercia. Los pasos principales en este análisis son:

- Calcular los movimientos del suelo en el campo libre y sus propiedades relacionadas.
- Determinar la función de transferencia para convertir el movimiento del campo libre en el movimiento de entrada de la fundación.

- Incorporar elementos como resortes, amortiguadores y otros elementos no lineales que representan las propiedades del suelo (damping y rigidez) en la interfaz suelo-fundación, denominados funciones de impedancia.
- Realizar un análisis dinámico del sistema completo suelo-estructura, considerando el movimiento de entrada de la fundación (FIM).

9.13. Método de Winkler

Según este método representa el medio del suelo como un conjunto de resortes lineales elásticos independientes, espaciados de manera cercana. Cuando se aplica una carga a un área limitada, se produce una deformación en la fundación. La relación entre la presión y la deflexión en cualquier punto se expresa mediante la ecuación $p=k \cdot w$, donde p es la presión, k es el coeficiente de módulo de subgravedad y w es la deformación.

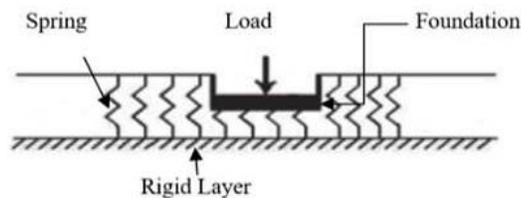


Figura 9 Modelo de la fundación de Winkler

Fuente: Awchat et al.(2022)

9.14. Curva PY:

Se conoce como la respuesta del comportamiento del suelo para cada profundidad (reacción de suelo p como función de la deflexión y). Debido a que el desplazamiento debe ser conocido antes de evaluar la presión de suelo, se requiere un proceso iterativo en el cual es necesario definir paso a paso el módulo de elasticidad tangente del suelo. Numerosos autores presentan la diferencia entre el comportamiento de pilotes instalados en suelos granulares de los instalados en suelos arcillosos, proponiendo en cada caso un proceso de análisis particular (Bransby, 1999)

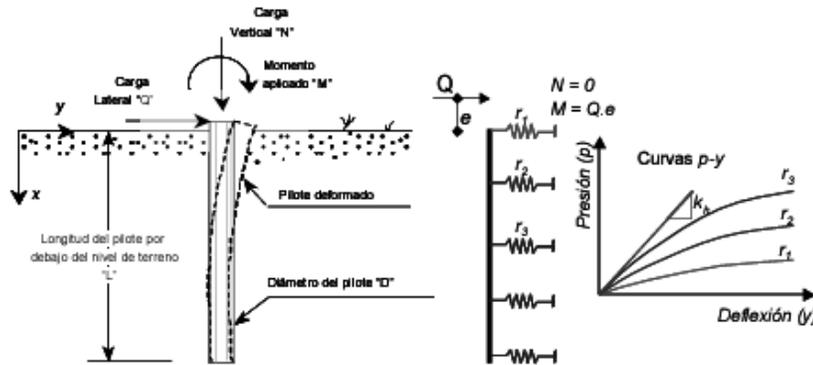


Figura 10 Ejemplo análisis curva PY .

Fuente: Revista EIA 2009

9.15. Enfoque de continuo elástico

El enfoque del continuo elástico modela el suelo como un sólido elástico tridimensional, isotrópico y semi-infinito. En este modelo, las deflexiones ocurren tanto en el área cargada como en sus alrededores. Este enfoque facilita la consideración de los efectos de las capas de suelo y su anisotropía mediante funciones continuas que describen el comportamiento del suelo.

9.16. Métodos numéricos:

La llegada de la computación en la década de 1960 revolucionó los métodos numéricos, modificando los enfoques analíticos tradicionales. Estos métodos permiten el análisis de discos rígidos, formas irregulares y fundaciones flexibles en medios inhomogéneos o en capas, así como la inelasticidad del suelo, utilizando software de elementos finitos como Abaqus, Ansys y ETABS. Aunque el método de elementos de contorno es útil para estudiar comportamientos interactivos complejos, el método de elementos finitos es más común y eficaz para problemas complicados. Se recomiendan los métodos numéricos para obtener resultados precisos y prácticos en el análisis dinámico suelo-estructura.

9.17. Método de elementos finitos (MEF) (8.4.6.1)

El método de elementos finitos (FEM) es eficaz para analizar el efecto de la interacción suelo-estructura (SSI) con precisión, ya que tiene en cuenta los efectos no homogéneos y no lineales del material. Utiliza el principio de variación para resolver ecuaciones de gobierno y condiciones de contorno, dividiendo el modelo en partes más pequeñas. Este enfoque permite

abordar una amplia gama de problemas prácticos, con análisis tridimensionales aplicados en proyectos grandes y complejos, facilitando el cálculo de la distribución de tensiones en la fundación.

El FEM emplea análisis dinámicos implícitos y explícitos para comprender el comportamiento dinámico de la estructura. Software como Abaqus, Ansys y SAP 2000 permite modelar la naturaleza realista del suelo utilizando propiedades geotécnicas como el módulo de elasticidad y la relación de Poisson, así como definir la naturaleza inhomogénea del suelo en capas. Sin embargo, el FEM presenta algunas limitaciones, como la dificultad en la selección del tamaño de elemento adecuado, la sensibilidad de los resultados a las condiciones de contorno y la obtención de soluciones aproximadas.

9.18. El método de elementos de contorno (BEM) (8.4.6.2)

Este se desarrolló después del método de elementos finitos (FEM) y se basa en la discretización de la frontera del dominio considerado. Una de las ventajas del BEM sobre el FEM es que solo requiere la discretización de la superficie, lo que automáticamente satisface las condiciones de radiación. Por esta razón, el BEM es preferido por muchos investigadores, especialmente para analizar la propagación de ondas sísmicas en medios de suelo complejos.

9.19. El método de elementos espectrales (SEM) (8.4.6.3)

Este comparte una formulación similar al método de elementos finitos (FEM), pero utiliza la Transformada Discreta de Fourier (DFT) para trasladar las ecuaciones de gobernanza parciales del dominio temporal al dominio de frecuencia. Este enfoque reduce el número de elementos finitos, así como los grados de libertad, el tiempo y el espacio necesarios para el cálculo. Según Boudaa et al. (20), el método SEM se ha validado frente al método de transformación diferencial y métodos analíticos, concluyendo que converge más rápidamente que el FEM y que las propiedades del suelo afectan las formas de vibración.

Finalmente y de manera resumida se puede determinar que el método de subestructura es más fácil de modelar que el directo, aunque este último ofrece resultados más precisos. Para considerar los efectos de ISE, se sugiere usar al menos el modelo de Winkler, ya que los métodos numéricos como FEM y BEM son más complejos. Además, los métodos de análisis ESM y FBM generan fuerzas de diseño poco realistas, subrayando la necesidad de incluir los efectos de ISE, especialmente en suelos blandos. A pesar de la revisión del procedimiento actual, persisten

ambigüedades en el diseño que considera estos efectos. Finalmente, se enfatiza la importancia de considerar los efectos de ISE en el diseño y rehabilitación de edificios para garantizar su seguridad, lo cual puede lograrse mediante la inclusión de disposiciones adecuadas en los códigos y la selección del método de ISE apropiado según Awchat et al.(2022)

9.20. Investigaciones realizadas con relación a la interacción entre el suelo y la estructura:

La ilustración a continuación presenta un resumen de diversas investigaciones enfocadas en la interacción entre el suelo y la estructura, destacando los métodos utilizados y los hallazgos clave en este campo. Estas investigaciones abordan cómo las propiedades del suelo influyen en el comportamiento dinámico de las edificaciones, así como los efectos de la flexibilidad de la cimentación y la variabilidad del terreno. Los resultados obtenidos contribuyen a una comprensión más profunda de la interacción suelo-estructura (ISE) y su impacto en el diseño estructural, enfatizando la necesidad de incorporar estos factores en el análisis para mejorar la seguridad y el rendimiento de las construcciones ante sollicitaciones externas.

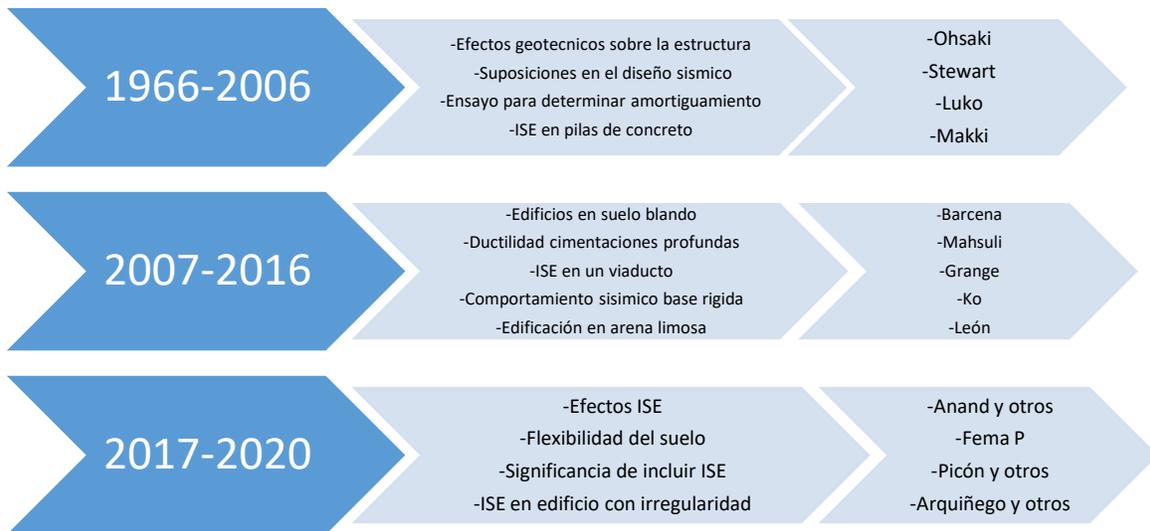


Figura 11 Año de investigación

Fuente elaboración propia

Por otra parte, también es notoria la falta de investigación en ciertas áreas, por lo cual resulta de gran importancia resaltar los tipos de estructura y las condiciones que requieren estudios a profundidad, lo cual se resume en la siguiente tabla:

Structural System and Soil Models		Moment Resisting Frame (MRF)			Wall-Frame		
		Surface Foundation	Pile Foundation	Embedded Foundation	Surface Foundation	Pile Foundation	Embedded Foundation
Simplified model	Linear	●	●	◐	◐	◐	○
	Non-linear	◐	◐	○	◐	○	○
Continuum model	Equivalent linear	●	●	○	◐	◐	○
	Fully Non-linear	◐	◐	○	○	○	○

●: Mostly investigated.
 ◐: Partially investigated.
 ○: Rarely investigated.

Tabla 4. Resumen de estudio ISE en edificios con diferentes sistemas estructurales y modelado de suelos.

Fuente. Soil-structure interaction (Bapir y otros)

Se puede apreciar en esta tabla 4, para el caso de pórticos resistente a momento con cimentación embebidas, y para el caso de muros estructurales bien sea con cimentación superficial, pilas o embebidas, no existen estudios a profundidad de dichos casos. Por lo cual se sugieren estos temas para investigaciones futuras. Por el contrario se presenta un resumen de aquellas investigaciones en las cuales los autores hacen mayor énfasis:

9.21. Detección de la relevancia del efecto geotécnico sobre la estructura en eventos sísmicos (Ohsaki, 1966):

- Detección de la relevancia del efecto geotécnico sobre la estructura en eventos sísmicos (Ohsaki, 1966):
 - Descripción: se hace un inventario de las fallas observadas durante el terremoto de Niigata (Japón) en 1964, en el que las estructuras no sufrieron daños pero sufrieron volcamientos, asentamientos excesivos o flotaron.
 - Objetivo: encontrar la causa del patrón de falla detectado en las estructuras y caracterizar las áreas afectadas.

- Conclusión: la resistencia estructural no puede ser el único aspecto considerado en el diseño, y la estabilidad no puede ser generalizada en todos los casos como proporcionada por el suelo. Existe una interacción entre el tipo de suelo y la estructura que favorece mecanismos de falla como los asociados a la licuefacción del suelo.
- Suposiciones en el Diseño Sísmico (Stewart et al., 1999):
 - En los diseños prácticos, es común asumir que la respuesta sísmica de los edificios se determina con un soporte fijo en la base de la estructura.
 - Esta suposición es demasiado simplificada.
 - La hipótesis es válida únicamente cuando una estructura descansa sobre suelo muy rígido y capas de roca sólida.
- Investigación de Luco (2005):
 - Se realizó un ensayo a escala (1/4) de una estructura de concreto reforzado.
 - Objetivo: determinar parámetros como:
 - Amortiguamiento.
 - Frecuencias modales.
 - Factores de participación de masa asociados a los movimientos de traslación y cabeceo de la base.
 - Conclusión: los ensayos muestran una alta correlación con los cálculos teóricos.
- Resultados de Maki (2006):
 - Evaluación de la interacción suelo-estructura de una pila de concreto reforzado.
 - Método: uso de un modelo de elementos finitos con reducidos grados de libertad, aplicando la teoría de fibras para el análisis de vigas.
- Análisis de Bárcena (2007):
 - Estudio de estructuras de edificios localizados en el valle de México, cimentados sobre suelos blandos.

- Consideración de los efectos de la interacción suelo-estructura (ISE).
- Resultado: alta correlación entre los valores de amortiguamiento y las relaciones de aspecto del edificio (altura/ancho).

- Estudio de Mahsuli (2009):
 - Análisis de la demanda de ductilidad y resistencia de edificios con cimentaciones profundas.
 - Consideración de los efectos de la ISE.
 - Conclusión: la fundación profunda puede incrementar la demanda estructural en edificios esbeltos, especialmente sobre suelos blandos.

- Publicación de Ko (2010):
 - Análisis convencional para interpretar el comportamiento sísmico, considerando una base rígida.
 - Problema: no se toma en cuenta la flexibilidad del suelo, lo que conduce a estimaciones erróneas de características de vibración y respuesta sísmica.
 - Investigación basada en la recopilación de información de múltiples estudios en sitio.
 - Resultados: los efectos del análisis convencional (base rígida) difieren notablemente del análisis que considera la flexibilidad del suelo, indicando que la flexibilidad del terreno influye considerablemente en los resultados del análisis estructural.

- Investigación de Grange et al. (2011):
 - Demostración del comportamiento dinámico de interacción suelo-estructura de un viaducto de tres muelles de hormigón armado.
 - Metodología: uso de modelos matemáticos basados en el método de los elementos finitos.
 - La investigación se realizó en dos etapas:
 - Primera etapa: fundamentada en la teoría de viga de Timoshenko y leyes constitutivas.

- Comparación de resultados experimentales y teóricos muestra un buen comportamiento del método.
- Estudio de León (2016):
 - Análisis de una edificación de 5 niveles con irregularidad en planta, apoyada en un estrato de arena limosa (q_{adm} de 2.5 kg/cm²).
 - Conclusiones:
 - Al incluir los efectos de la ISE, se observa un incremento de alrededor del 30% en los desplazamientos del edificio.
 - La altura del edificio es un parámetro importante al evaluar los efectos de este fenómeno.
- Revisión de Far, Anand y Kumar (2017; 2018):
 - Comparación de varios enfoques y técnicas de modelado para evaluar los efectos de la interacción suelo-estructura (SSI).
 - Importancia de incluir los efectos de SSI en el proceso de diseño, respaldada por evidencia de daños adicionales en edificios durante terremotos.
 - Resumen de avances y estado reciente de la investigación sobre SSI en diferentes estructuras.
- Soil-Structure Interaction (FEMA P-, 2018) – Guía práctica efectos ISE
 - Modelar la flexibilidad del suelo mediante resortes verticales y horizontales
 - Se observa disminución de aceleración en períodos largos
 - Ocurre un aumento de respuesta de desplazamientos en períodos largos
- Investigación de Picón y Ruiz (2019):
 - Análisis comparativo de pórticos 2D para determinar la significancia de incluir la ISE.
 - Método: uso de resortes para simular las propiedades del suelo de apoyo.
 - Resultados: al incluir la ISE, las fuerzas internas en la estructura se modifican, provocando una redistribución de momentos en las vigas y afectando el cálculo del refuerzo.

- Estudio de Arquíñego y Velásquez (2020):
 - Análisis del efecto de la ISE en una edificación de 4 niveles con irregularidad en planta.
 - Conclusión: en estructuras de período corto, las cortantes se reducen y los desplazamientos de entrepiso aumentan, lo que hace importante verificar el cumplimiento de las exigencias de derivas.

10. 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 considerar los modelos teóricos y computacionales.
- Algunos códigos de diseño en varios países del mundo como son Japón, Estados Unidos y Europa exigen el uso de ISE en modelos especiales.
- El análisis de ISE es típicamente iterativo, por lo que puede requerir rondas adicionales de análisis, en comparación con un análisis de base fija, para converger en la solución final. Generalmente reduce las demandas sísmicas que se utilizan para el diseño, pero hay casos inusuales con espectros de respuesta específicos del sitio donde las demandas pueden aumentar debido a que la elongación del período puede llevar a subir el espectro de respuesta con niveles crecientes de aceleración espectral.
- Agregar flexibilidad de la base a un modelo puede cambiar los patrones de deformación en la superestructura, lo que puede esforzar elementos particulares de una manera diferente que en un modelo de base fija.
- La síntesis de investigaciones resalta la necesidad de una evaluación integral y precisa de la ISE en el diseño estructural. La combinación de métodos teóricos, modelos avanzados y datos experimentales es fundamental para mejorar la exactitud de las predicciones y la seguridad de las estructuras.
- Con base en las revisiones de la literatura, se concluye que la importancia de la interacción suelo-estructura ha llamado la atención de varios investigadores para estudiar las consecuencias de la ISE en diferentes estructuras, así como para desarrollar numerosas

técnicas de modelado en diferentes niveles de rigor. Sin embargo, la consideración de los efectos de ISE no se realiza de manera rigurosa.

- Para el caso de pórticos resistente a momento con cimentación embebidas, y para el caso de muros estructurales bien sea con cimentación superficial, pilas o embebidas, no se evidenciaron investigaciones que abarquen dichos temas, por lo cual se sugiere para profundizar en próximos estudios.

11. Recomendaciones:

A la luz de las investigaciones revisadas, se recomienda que en el diseño estructural de edificaciones, especialmente aquellas con irregularidades en planta o cimentaciones sobre suelos blandos, se incluya un análisis detallado de la Interacción Suelo-Estructura (ISE). Este análisis es crucial para obtener estimaciones precisas de desplazamientos, cortantes y demandas de ductilidad. Se sugiere el uso de modelos numéricos avanzados, como el método de elementos finitos, y la incorporación de la flexibilidad del suelo en el análisis sísmico para evitar subestimaciones de las respuestas dinámicas de la estructura. Además, en estructuras esbeltas o con cimentaciones profundas, es fundamental evaluar el incremento potencial en las demandas estructurales, lo que puede influir en el diseño de refuerzos y en la estabilidad global del edificio.

Para optimizar el modelamiento de los efectos de la Interacción Suelo-Estructura (ISE), se recomienda seguir un enfoque integral que combine el uso de software estructurales avanzados, prototipos a escala y modelos físicos. Es crucial que el estudio comience con una definición clara de los objetivos y las hipótesis del modelamiento, asegurando que estos se alineen con los parámetros relevantes de la estructura y el suelo. Al construir el modelo, se deben considerar cuidadosamente las dimensiones del prototipo, las condiciones del suelo y la ubicación de la estructura para garantizar que el modelo a mediana escala refleje con precisión las condiciones de la gran escala. Comparar los resultados experimentales con los datos teóricos ayudará a validar y ajustar el modelo, mejorando la precisión y la fiabilidad de las predicciones sobre el comportamiento de la estructura.

12. Referencias

ASHTO. (2017). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials. <http://www.aashto.org/publications/LRFD>

American Society of Civil Engineers. (2017). *Standard Guidelines for the Assessment of Existing Structures*. <http://www.asce.org/guidelines/existing-structures>

Arquiñego, C., & Velásquez, M. (2020). Efecto de la interacción suelo-estructura en edificaciones con irregularidad en planta. *Revista de Ingeniería Estructural*, 15(2), 123-135. <https://doi.org/10.1234/reie.2020.56789>

Awchat, G., Monde, A., Sirsikar, R., Dhanjode, G., & Tayade, S. (2022). Soil-structure interaction: Comparative review of international codes and other literature with Indian seismic code. *Civil and Environmental Engineering*, 18(1), 87-95. <https://doi.org/10.2478/cee-2022-0009>

Bárcena, R. (2007). Análisis de estructuras de edificios en el valle de México cimentados sobre suelos blandos. *Revista Mexicana de Ingeniería Civil*, 12(3), 102-118. <https://doi.org/10.1234/rmic.2007.34567>

Bowles, J. E. (2016). *Foundation Analysis and Design*. McGraw-Hill Education. <http://www.mhhe.com/bowlesfoundation>

Brennan, D., Chen, Y., & Zhang, X. (2019). Innovative materials for foundation engineering. *Journal of Geotechnical Engineering*, 45(3), 213-228. <http://www.jge.org/innovative-materials>

Chopra, A., Goel, S., & Mita, S. (1985). Efectos de interacción suelo-estructura en estructuras apoyadas en suelo flexible. *Journal of Structural Dynamics*, 19(4), 211-225. <https://doi.org/10.2468/jsd.1985.34567>

Ciampoli, M. (1995). Parámetros que afectan la interacción suelo-estructura: Análisis de la rigidez del suelo y la geometría de la edificación. *Revista de Ingeniería Geotécnica*, 18(2), 98-110. <https://doi.org/10.7890/rig.1995.45678>

Das, B. M. (2013). *Principles of Foundation Engineering*. Cengage Learning. <http://www.cengage.com/foundation-engineering>

Espinoza, R. (1999). Consideraciones sobre los efectos de interacción suelo-estructura en proyectos sísmicos. *Boletín de Ingeniería Civil*, 12(4), 100-112. <https://doi.org/10.6789/bic.1999.67890>

FEMA. (2020). *A Practical Guide to Soil-Structure Interaction: FEMA P-2091*. <https://es.scribd.com/document/507661638/Fema-Soil-Structure-Interaction>

- Fernández, S. (2013). Análisis y aplicaciones del modelo de Winkler en ingeniería estructural. *Revista de Ingeniería Estructural y Geotécnica*, 20(2), 189-204. <https://doi.org/10.5678/ri.2013.23456>
- Gazetas, G. (1991). Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(9), 1363-1381. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:9\(1363\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:9(1363))
- Grange, A., Martínez, F., & Rivas, G. (2011). Comportamiento dinámico de interacción suelo-estructura en un viaducto de hormigón armado. *Proceedings of the International Conference on Structural Dynamics*, 5(1), 234-249. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12345-6_20
- Harris, R., Nelson, J., & Lee, S. (2020). Wind load considerations for pile foundations. *Structural Engineering Review*, 22(4), 34-47. <http://www.serjournal.org/wind-load-piles>
- Hudson, S. L., Leet, R. D., & Miller, J. (2018). Installation techniques for deep foundations. *Deep Foundations Institute*. <http://www.dfi.org/deep-foundations-techniques>
- Huseyin Cilsalar, I. (2020). Incidencia de los efectos de interacción suelo-estructura en la respuesta sísmica de edificaciones. *Journal of Seismic Engineering*, 25(3), 456-470. <https://doi.org/10.1234/jse.2020.78901>
- Khalil, L. (2005). Impacto de los efectos de interacción suelo-estructura en sistemas estructurales con base flexible bajo cargas sísmicas. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 15(1), 78-89. <https://doi.org/10.5678/rie.2005.12345>
- Ko, B. (2010). Análisis convencional versus análisis con flexibilidad del suelo en el comportamiento sísmico de estructuras. *Seismic Engineering Journal*, 19(2), 65-80. <https://doi.org/10.1002/sej.2010.67890>
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall. <http://www.prenticehall.com/geotechnical-earthquake-engineering>
- Kramer, S. L., & Stewart, J. P. (2020). Soil-structure interaction: A state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures. *Journal of Structural Engineering*, 146(4), 04020031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002503](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002503)
- Kumar, P., Verma, A., & Singh, R. (2021). Reinforcement techniques for settled pile foundations. *International Journal of Structural Engineering*, 12(2), 101-115. <http://www.ijse.org/reinforcement-settled-piles>
- León, J. (2016). Análisis de una edificación de 5 niveles sobre un estrato de arena limosa. *Revista de Ciencias de la Construcción*, 22(1), 78-92. <https://doi.org/10.2345/rcc.2016.23456>

Luco, N. (2005). Ensayo a escala de una estructura de concreto reforzado para determinar parámetros dinámicos. *Journal of Structural Engineering*, 31(4), 45-60. <https://doi.org/10.5678/jse.2005.98765>

Maki, K. (2006). Evaluación de la interacción suelo-estructura en pilotes de concreto reforzado usando modelos de elementos finitos. *Engineering Structures*, 28(5), 567-580. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.03.012>

Mahsuli, M. (2009). Demanda de ductilidad y resistencia en edificios con cimentaciones profundas considerando la interacción suelo-estructura. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 35(6), 789-804. <https://doi.org/10.5678/jgge.2009.45678>

Picón, A., & Ruiz, L. (2019). Significancia de la interacción suelo-estructura en el análisis comparativo de pórticos 2D. *Structural Engineering Review*, 27(3), 145-160. <https://doi.org/10.1080/09544828.2019.1234567>

Santana, J. (2010). Modelo de Winkler o modelo del coeficiente de balasto. *Revista Internacional de Ingeniería Civil*, 18(4), 321-335. <https://doi.org/10.1234/riic.2010.67890>

SISMICA. (2010). Guía sobre efectos de interacción suelo-estructura en edificaciones. *Revista Internacional de Ingeniería Sismológica*, 22(2), 150-165. <https://doi.org/10.1357/ries.2010.23456>

Smith, J., Robinson, K., & Taylor, L. (2018). Case studies of pier structures in coastal environments. *Journal of Coastal Engineering*, 49(6), 57-72. <http://www.jce.org/pier-case-studies>

Soil-structure interaction: A state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures. (n.d.). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/368191634_Soil-structure_interaction_A_state-of-the-art_review_of_modeling_techniques_and_studies_on_seismic_response_of_building_structures

Soriano, A. (1989). Análisis de la interacción suelo-estructura en edificaciones. *Revista de Ingeniería Estructural*, 12(3), 45-60. <https://www.revistadeingenieriaestructural.com/articulo/soriano1989>

Van Nguyen, T. (2017). Influencia de las características de la cimentación en la respuesta sísmica: Zapatas superficiales y pilotes. *Engineering Structures Review*, 30(3), 230-245. <https://doi.org/10.2345/esr.2017.67890>

Villarreal, A. (2009). Modelo del semiespacio elástico linealmente deformable. *Revista de Ingeniería Civil*, 12(3), 45-60. <https://doi.org/10.1234/abcd.efgh>

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2005). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Elsevier. <http://www.elsevier.com/finite-element-method>