

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA EN UN EDIFICIO CON SÓTANOS:  
CONSIDERACIONES PARA EL ANÁLISIS SÍSMICO**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de BACHILLER EN  
CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA CIVIL**

**AUTORES:**

Diego Leonardo Puente Quisca  
Edgar Alexander Vilcamich Muñoz  
Jhoan Dante Castro Solorzano  
Julinho Moner Andrade Ceferino  
Ladi Diana Cuadros Urbano

**ASESOR:**

Robinson Ucañan Diaz

**Lima, Junio, 2022**

## RESUMEN

En una edificación con sótanos, el análisis sísmico y diseño tradicional tiende a considerar a la estructura como un sistema empotrado en la base, para posteriormente diseñar la subestructura de sótanos de manera independiente. Sin embargo, el análisis de la interacción entre suelo y estructura es más complejo, por lo que no puede generalizarse un solo procedimiento como método para estimar el comportamiento de la estructura ante un sismo. En la mayoría de los casos, si bien analizar la estructura como empotrada en la base no ha presentado complicaciones y se aplica según las normas de diseño, existe un conjunto de parámetros que hacen necesaria la consideración de la interacción suelo-estructura en el análisis. El presente trabajo de investigación expone aquellos factores que hacen fundamental que se consideren los sótanos como parte integral de la estructura dentro del análisis sísmico.

Este conjunto de factores debe ser tomado en cuenta como indicador de que el método tradicional de diseño no sea el adecuado para reflejar el comportamiento real de la estructura. De este modo, el diseño y análisis comienza considerando un solo sistema suelo-sótanos-estructura, para lo cual se han desarrollado modelos matemáticos y computacionales que estiman las respuestas de la estructura ante sismos. Se deben definir las relaciones implicadas en el análisis sísmico para identificar los parámetros críticos; es así que, como parámetro fundamental, el tipo de suelo determinará la necesidad de considerar la interacción suelo-estructura o empotramiento en la base.

Es importante reconocer que la norma peruana continúa con el modelo tradicional de diseño y análisis, sin considerar la interacción suelo-estructura; debido a ello, los profesionales en la materia se apoyan de normativa extranjera para edificaciones que requieran de especial cuidado y precisión. Teniendo conocimiento de los parámetros a considerar antes de optar por el método tradicional de diseño, se podrá tener una mejor noción del comportamiento esperado de la estructura ante un sismo.

# ÍNDICE

CAPÍTULO 1: ASPECTOS GENERALES.....	1
1.1.    Introducción .....	1
1.2.    Justificación.....	2
1.3.    Alcance.....	3
1.4.    Objetivos .....	3
1.4.1.    Objetivo general.....	3
1.4.2.    Objetivos específicos.....	3
1.5.    Metodología .....	4
CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1.    Antecedentes .....	5
2.1.1.    Normativa extranjera.....	5
2.1.2.    Interacción suelo - estructura .....	9
2.2.    Características de la edificación .....	13
CAPÍTULO 3: PARÁMETROS CRÍTICOS AL CONSIDERAR SÓTANOS EN EL ANÁLISIS SÍSMICO.....	16
3.1.    Parámetros del suelo.....	17
3.1.1.    Análisis en suelo flexible .....	17
3.1.2.    Parámetros para determinar el perfil del suelo .....	18
3.2.    Zonificación .....	19
3.3.    Parámetros estructurales.....	25
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	28
4.1.    Conclusiones .....	28
4.2.    Recomendaciones.....	29
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	31

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Esquema del análisis directo de la interacción suelo-estructura usando modelado continuo por elementos finitos

Figura 2: Apoyo entre la cimentación y el suelo

Figura 3: Modelo Suelo-Cimentación-Estructura a través de Plaxis 2D considerando elementos finitos

Figura 4: Zonas sísmicas del territorio peruano

Figura 5: Respuesta de las edificaciones de base empotrada

Figura 6: Respuesta de las edificaciones con modelos amortiguados en sus bases

Figura 7: Desplazamientos y derivas de edificaciones de base empotrada y aislada

Figura 8: Fuerzas cortantes de las edificaciones de base empotrada y aislada

Figura 9: Esquema del modelo de un solo grado de libertad con diferentes niveles de sótano

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Distorsiones del periodo de la edificación considerando efectos de interacción suelo-estructura

Tabla 2: Clasificación de los perfiles de suelo

Tabla 3: Factor ZS



## **CAPÍTULO 1: ASPECTOS GENERALES**

### **1.1. Introducción**

El comportamiento de una estructura al someterse a demandas sísmicas continúa siendo tema de investigación debido a la cantidad de variables involucradas. A pesar de ello, la norma peruana de diseño sismorresistente no presenta consideraciones cuando trata de analizar un sistema suelo-estructura, simplificando el diseño al asumir empotramiento en la base de la estructura y un diseño de sótanos de manera independiente. Debido a esto, los ingenieros responsables tienden a recurrir a normativa extranjera que sea aplicable al suelo peruano, sobre todo en estructuras especiales donde se ha de tener gran consideración con las respuestas y comportamiento sísmico. Tal es el caso de edificios de gran altura, ante la tendencia de construir estos proyectos, se hace presente la necesidad de diseñar sótanos que cumplan con las demandas de la edificación, como, por ejemplo, la construcción de amplios estacionamientos subterráneos para la cantidad de personas a las que la construcción está destinada.

Investigaciones actuales han demostrado la distorsión entre resultados al diseñar de manera convencional y considerando la interacción suelo-estructura. Se presentan modelos numéricos y computacionales que abarcan parámetros estructurales y geotécnicos, como el tipo de suelo, para determinar una respuesta ante sismos con mayor precisión. A pesar de ello, se es consciente de la cantidad de recursos que este análisis puede llegar a tener; por lo que se pone en duda su consideración en la etapa de diseño de un proyecto, sumado a la gran desinformación que trae el utilizar de manera repetitiva el diseño convencional de sótanos.

Dado el desconocimiento de cómo y en qué situaciones tratar la interacción suelo estructuras al diseñar sísmicamente una edificación con sótanos, surgen las siguientes interrogantes: ¿Cuáles son los factores que hacen necesaria la consideración de sótanos para el análisis sísmico? y ¿cuáles son los parámetros críticos observados y estudiados por normativas extranjeras que puedan ser aplicables en suelo limeño?

## 1.2. Justificación

En la actualidad, existen diversas investigaciones acerca del comportamiento de una estructura durante sismos, las cuales han sido estudiadas con mayores niveles de precisión debido a los avances tecnológicos. A pesar de ello, las normas que se aplican para el análisis sísmico de edificaciones tienden a simplificar el diseño y, por consecuencia, el comportamiento estimado; son las mismas normas de diseño sismorresistente que proponen factores de seguridad y amplificaciones, basados en estudios y experiencias previas de eventos sísmicos, esto para que se evite la pérdida de vidas humanas, se asegure la continuidad de los servicios básicos y se minimice los daños a la propiedad (Norma E.030, 2018).

Una de estas simplificaciones trata sobre la consideración de sótanos para el análisis sísmico, o la interacción suelo -estructura; puesto que se suele considerar una cortante en la base de la estructura causada por el sismo y se estima que el suelo permanecerá elástico durante el evento. Sin embargo, el análisis sísmico tiende a ser más complejo si se desea estimar correctamente el comportamiento de la edificación, requiriendo de un gran esfuerzo para analizar la linealidad o no linealidad de la interacción suelo-estructura. A pesar de que se han desarrollado modelos y procedimientos complejos que se aproximen a resultados precisos de comportamiento, y que estos estén validados por distintos investigadores, no es una práctica común considerar este efecto en la ingeniería. (Pinto y Ledezma 2019; Naeim y Stewart 2008).

Ante la posibilidad de un gran evento sísmico en el Perú, existe también la posibilidad que las normas de diseño sismorresistente se vean afectadas por el comportamiento y daño que será observado. Es deber de los ingenieros responsables poder estimar estos resultados con precisión, dados los avances tecnológicos de la actualidad; sin embargo, se es consciente de los recursos que se requieren en el desarrollo del análisis sísmico. Es por ello que es importante establecer los lineamientos y/o características de la estructura que hacen necesaria la consideración de sótanos en el análisis sísmico como parte de la interacción suelo-estructura.

### **1.3. Alcance**

Con el fin de determinar un conjunto de características de una estructura que convierte la consideración de sótanos en parte fundamental del análisis sísmico, se llevará a cabo una investigación de normas extranjeras y un estudio de la norma peruana sobre la inclusión del efecto de interacción suelo-estructura. Esto se realizará teniendo en cuenta las características geológicas y parámetros sísmicos del suelo limeño, así como los tipos de edificaciones en las que se puede aplicar las normas.

Además, la presente investigación describe aquellos factores representativos en diversos estudios que consideren sótanos en sus respectivos análisis. De este modo, se puede determinar los parámetros que tengan mayor impacto en comportamiento de la estructura en base a la revisión, dada la distorsión entre resultados al considerar o no el comportamiento sísmico suelo-estructura; parámetros como, por ejemplo, la altura de la edificación, el número de sótanos, módulos de corte del terreno, entre otros.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo general**

Determinar los factores que hacen fundamental la consideración de los sótanos dentro del análisis sísmico de la estructura.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Identificar normas extranjeras que integren el análisis suelo-estructuras en el diseño sísmico.
- Identificar las características de las estructuras que hacen necesaria la consideración de sótanos en el diseño.
- Dar a conocer el conjunto de parámetros críticos que afectan el análisis sísmico al considerar la interacción suelo-estructura.



- Formular conclusiones y recomendaciones acerca de la consideración de sótanos en el análisis sísmico de la estructura.

## **1.5. Metodología**

El presente estudio consta de una investigación cualitativa con el fin de alcanzar los objetivos planteados; para ello, se establece como principal herramienta de estudio a la revisión sistemática de la literatura relacionada con la interacción suelo-estructura en edificaciones con sótanos. En primer lugar, se realizará una síntesis de la información recolectada sobre los parámetros que se han considerado como parte fundamental para el análisis sísmico de una edificación con sótanos, así como la revisión de normativa extranjera que considere la interacción suelo-estructura para el diseño y análisis sísmico.

En segundo lugar, se definirán aquellos parámetros que hacen necesaria la consideración de sótanos en el análisis sísmico en el contexto limeño. Además, se realizará un comparativo entre las normas investigadas que puedan ser aplicables en el suelo de Lima, en conjunto con lo descrito por la norma actual de diseño sismorresistente.

Por último, se plantean los lineamientos que hacen fundamental la consideración de sótanos para el análisis sísmico de una estructura, ordenando los factores de acuerdo su importancia o efecto en la misma. De este modo, se podrán establecer las principales conclusiones y recomendaciones sobre las consideraciones actuales que establece la norma peruana.

## CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Antecedentes

#### 2.1.1. Normativa extranjera

La respuesta de una estructura al movimiento sísmico se ve afectada por las interacciones de tres sistemas vinculados: la estructura, la cimentación y los medios geológicos subyacentes y circundantes a la cimentación.

Un análisis sísmico de la interacción entre el suelo y la estructura evalúa la respuesta general del conjunto de sistemas vinculados a un movimiento del suelo en campo libre específico, es decir, un movimiento que no se ve afectado por las vibraciones estructurales o la dispersión de ondas en el entorno de los cimientos de la estructura.

*Los efectos de la interacción suelo estructura no se toman en consideración para la condición teórica de base rígida, que es típico de los modelos analíticos de estructuras. En consecuencia, los efectos de la interacción suelo-estructura reflejan las diferencias entre la respuesta real de la estructura y la respuesta para la condición teórica de base rígida. (American Society of Civil Engineers, 2017, p. 703)*

Los siguientes efectos de interacción suelo estructura pueden afectar significativamente la respuesta de las estructuras:

**Deformaciones de la cimentación:** Las deformaciones axiales, de flexión y cortantes de los elementos de la fundación ocurren como resultado de las cargas aplicadas por la superestructura y el suelo circundante. Además, el suelo circundante se deforma debido a las cargas de los cimientos. Tales deformaciones representan la demanda sísmica para la cual se deben diseñar los componentes de la cimentación. Estas deformaciones también pueden afectar significativamente el comportamiento general del sistema, especialmente con respecto a la amortiguación.

**Efectos de interacción inercial:** La inercia desarrollada en una estructura oscilante da lugar a cizallamiento, momento y torsión en su base. Estas cargas a su vez provocan desplazamientos y rotaciones de la cimentación en relación con el desplazamiento del

movimiento del terreno en campo libre. Estos desplazamientos y rotaciones relativas sólo son posibles debido a la flexibilidad en el sistema suelo-cimentación. Además, los movimientos del terreno en campo libre relativos de la base dan lugar a la disipación de energía a través del amortiguamiento radial (es decir, el amortiguamiento asociado con la propagación de ondas en el suelo alejándose de los cimientos, que actúa como fuente de ondas) y el amortiguamiento histerético del suelo. Esta disipación de energía puede afectar significativamente la amortiguación general del sistema suelo-cimentación-estructura. Debido a que estos efectos están arraigados en la inercia estructural, se denominan efectos de interacción inercial.

Efectos de interacción cinemáticos: Efectos en donde los elementos rígidos de la cimentación, colocados en la superficie del suelo o debajo de ella, permiten que el movimiento de la cimentación sea diferente del movimiento del terreno en campo libre.

La metodología para calcular los efectos cinemáticos e inerciales de la interacción entre el suelo y la estructura se tomaron de las recomendaciones del reporte NIST GCR 12-917-21.

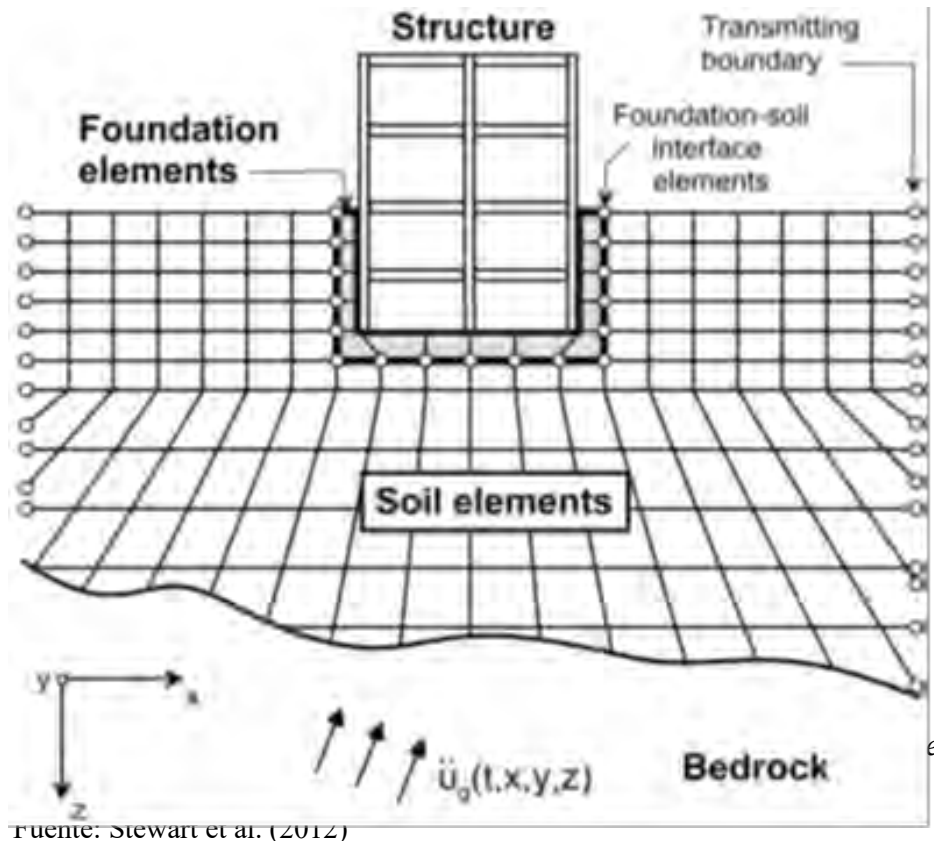
*Los métodos que se pueden utilizar para evaluar los efectos anteriores se pueden categorizar como análisis directo y enfoque de subestructura. En un análisis directo, el suelo y la estructura se incluyen dentro del mismo modelo y se analizan como un sistema completo. En un enfoque de subestructura, el problema de la interacción suelo-estructura se divide en distintas partes que se combinan para formular la solución completa. (Stewart et al., 2012, p. 28)*

- Análisis directo

El suelo a menudo se representa como un espacio continuo (por ejemplo, elementos finitos) junto con la cimentación y los elementos estructurales, fronteras de transmisión en los límites de la malla del suelo y elementos de interfaz en los bordes de la cimentación.

*La evaluación de la respuesta del sitio utilizando el análisis de propagación de ondas a través del suelo es importante para este enfoque. Dicho análisis se realiza con mayor*

frecuencia utilizando una representación lineal equivalente de las propiedades del suelo en formulaciones numéricas de elementos finitos, diferencias finitas o elementos de contorno. Los análisis directos pueden abordar todos los efectos de la interacción suelo-estructura descritos anteriormente, pero la incorporación de la interacción cinemática es un desafío porque requiere la especificación de movimientos de entrada espacialmente variables en tres dimensiones. Debido a que la solución directa del problema de la interacción suelo-estructura es difícil desde un punto de vista computacional, especialmente cuando el sistema es geoméricamente complejo o contiene no linealidades significativas en el suelo o los materiales estructurales, rara vez se usa en la práctica. (Stewart et al., 2012, p. 28,29)



- Enfoque de subestructura

La consideración adecuada de los efectos de la interacción suelo-estructura en un enfoque de subestructura requiere una evaluación de los movimientos del terreno en campo libre y

*las propiedades del material del suelo correspondientes, una evaluación de las funciones de transferencia para convertir movimientos de campo libre en movimientos de entrada de la cimentación, incorporación de resortes y amortiguadores (o elementos no lineales más complejos) para representar la rigidez y el amortiguamiento en la interfaz suelo-cimentación, y un análisis de respuesta del sistema combinado estructura-resorte/amortiguador con el movimiento de entrada de cimentación aplicado. La superposición inherente en un enfoque de subestructura requiere una suposición de comportamiento lineal del suelo y la estructura, aunque en la práctica este requisito a menudo se sigue solo en un sentido lineal equivalente. (Stewart et al., 2012, p. 29)*

Así como la ASCE hace mención a la interacción suelo estructura, la Eurocode 8 (2012, p. 104) resalta que la rigidez del suelo se define por la velocidad de onda de corte o, de manera equivalente, por el módulo de corte del suelo. Asimismo, considera que, debido a la flexibilidad del suelo, el periodo fundamental de vibración se alarga dando a lugar a un movimiento de balanceo importante. Por ejemplo, en la ciudad de México, posterior al terremoto de Michoacán Guerrero de 1985, se tenían dos edificaciones adyacentes de igual altura y con una junta de separación pequeña; durante este evento, se produjo fallas estructurales, originando pérdidas de los tres pisos superiores de una de las estructuras. De haberse dado el caso, si la estructura hubiese sido cimentada sobre roca los movimientos de balanceo hubiesen sido pequeños y las estructuras podrían haber sobrevivido al evento telúrico.

### 2.1.2. Interacción suelo - estructura

La influencia del suelo en la estructura es uno de los parámetros que tienen que tomarse en cuenta si es que se requiere aproximar con mayor exactitud los cálculos teóricos con los resultados reales del comportamiento de la estructura. Para una mayor comprensión de estos fenómenos, primero, se pasará a definirlo conceptualmente. Una definición válida de esta interacción es la propuesta por los autores Hermosillo, Deméneghi, Legorreta y Sanginés (2016):

*La interacción suelo-estructura es aquella parte de la ingeniería que estudia las deformaciones del terreno de cimentación cuando éstas se ven afectadas por la presencia y rigidez de la propia estructura. La influencia de la estructura puede ser en condiciones estáticas, lo cual es tratado por la interacción estática suelo-estructura, o puede ser en condiciones dinámicas, lo cual cae en el campo de la interacción dinámica suelo-estructura. (p. 1)*

Esta investigación se enfoca en el campo de la interacción dinámica suelo-estructura por las siguientes razones: por un lado, la interacción estática suelo-estructura es fácil de calcular, ya que se conocen con mayor precisión qué parámetros del suelo y estructura influyen en esta. Por otro lado, la complejidad de las fuerzas dinámicas, que es generado por las aceleraciones sísmicas, es la más difícil de calcular y que hasta el momento no se conocen con exactitud qué propiedades características de la estructura y el suelo influyen en este comportamiento. Al término de esta investigación, se tendrá más claro qué parámetros de la estructura y/o suelo condicionan el uso del modelo simplificado de una edificación (empotrado en su base) o el empleo de modelos más complejos con resortes que simulan el comportamiento del suelo.

La aplicación más conveniente de esta interacción dinámica suelo-estructuras es sobre todo en zonas de alta sismicidad y donde se presentan suelos blandos. Sin embargo, su aplicación en zonas de baja sismicidad y suelos rígidos es injustificado por su complejidad y alto costo, ya que en estas condiciones los modelos simplificados de la estructura (empotrados en su base) pueden funcionar bastante bien y aproximarse a los resultados reales.

La viabilidad de esta investigación para determinar qué parámetros de la edificación y el suelo influyen para optar por un modelo más complejo se apoya en las siguientes afirmaciones que realiza la autora Moreno (2019) tras culminar sus investigaciones en su tesis doctoral:

*Los resultados teóricos y observaciones de la respuesta de diferentes inmuebles indicaron que al haber una gran flexibilidad en los suelos esto se traduce en el incremento del periodo natural efectivo de las estructuras; asimismo concluyó que la presencia de construcciones vecinas puede modificar los espectros de piso calculados suponiendo que los edificios están aislados. (p. 1)*

Por ejemplo, para un edificio en particular analizado por esta autora se puede ver que la variación del periodo es considerable para un análisis con y sin considerar la interacción del suelo-estructura. Estas evaluaciones se realizaron de la siguiente manera: en primer lugar, para el análisis sísmico sin considerar la influencia del suelo, la autora Moreno (2019) tuvo en cuenta que los sistemas de piso se consideren como diafragmas para el análisis modal-espectral; adicionalmente tomó en cuenta las recomendaciones establecidas en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de construcción para el Municipio de Puebla (p. 96). Y como resultado de este análisis, la autora obtuvo el periodo de la estructura, lo cual fue de 2.57 segundos. En segundo lugar, para el análisis sísmico considerando la interacción del suelo-estructura, la misma autora realizó el análisis, pero esta vez por diversos métodos, los cuales arrojaron resultados (periodos) mayores a lo mencionado anteriormente.

A continuación, se muestra la tabla 1, en donde se puede visualizar la distorsión del periodo de la edificación ocasionado por la influencia de la interacción suelo-estructura. Cabe recalcar que estos valores corresponden a los resultados de la aplicación de diferentes métodos.

**Tabla 1:** *Distorsiones del periodo de la edificación considerando efectos de interacción suelo-estructura*

Método	Te (s)
MDOC (2015)	2.817
A. E. Sargsian	3.074
Pais y Kausel (1988), Gazetas (1991) y Mylonakis, Nikolaou y Gazetas (2006).	2.858

Fuente: Moreno (2019)

De la tabla anterior, se puede observar que los resultados obtenidos tras considerar la interacción del suelo-estructura varía sobre todo para el método de A. E. Sargsian. Sin embargo, para los otros métodos, los resultados son similares y mayores que el periodo obtenido sin considerar los efectos del suelo. Estos resultados nos garantizan que es necesario el análisis del suelo y la estructura en conjunto si es que se quiere estimar con mayor exactitud el comportamiento real de la estructura.

Como se había indicado anteriormente, en la práctica es común analizar la estructura, la cimentación (que puede ser los sótanos) y el suelo de manera independiente. Esta se realiza con la finalidad de simplificar los modelos y los cálculos. Sin embargo, los resultados teóricos no siempre van a coincidir con los resultados reales, por lo que esta variación dependerá de muchos factores que se están investigando en este trabajo. Según Meli (2006, como se citó en Moreno, 2019) el procedimiento de analizar separadamente el suelo-cimentación-estructura es incorrecto porque “las deformaciones que se tienen en la cimentación y el suelo modifican la distribución de presiones sobre la cimentación y las fuerzas internas en la estructura” (p. 4).

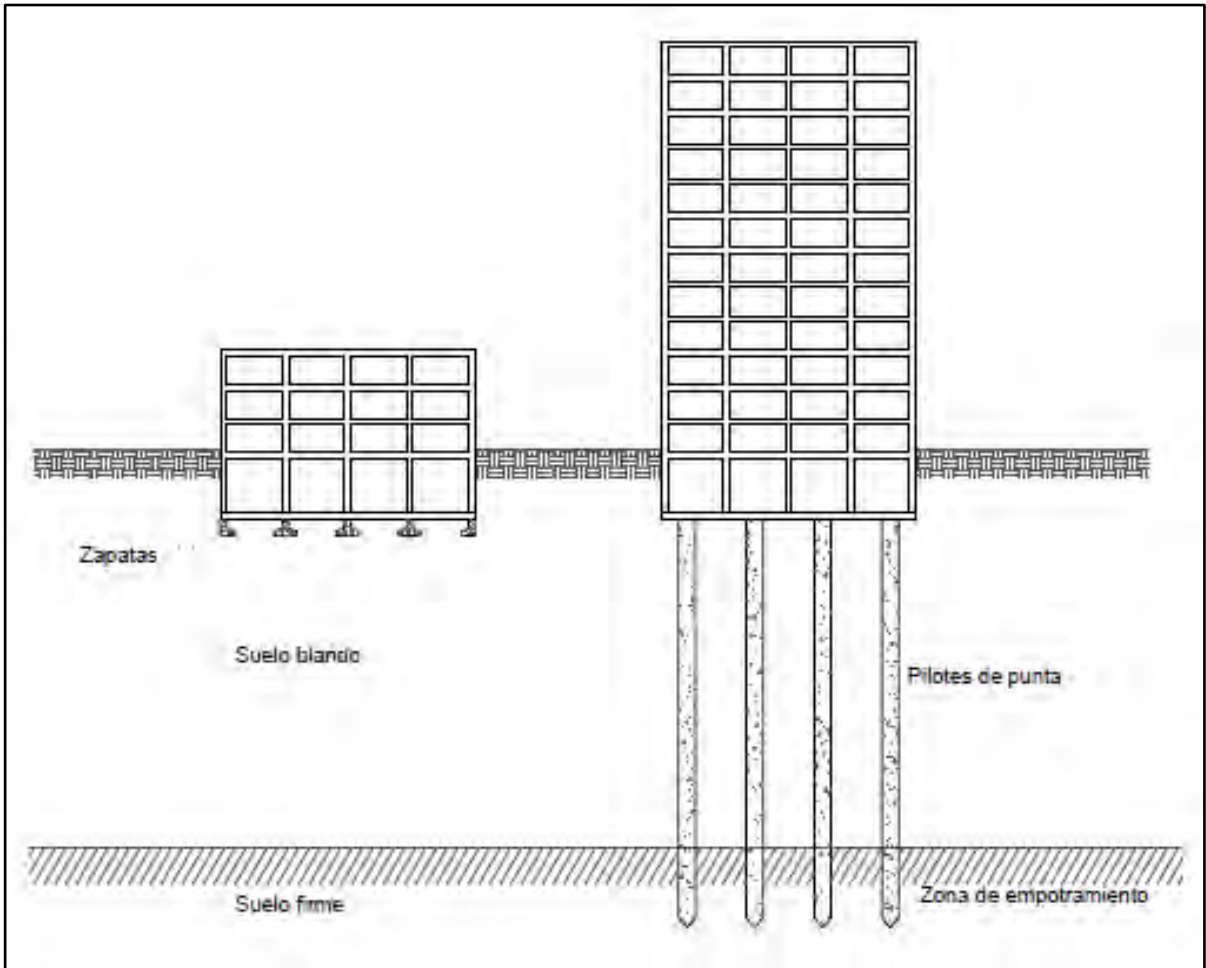
Asimismo, según Freire (2001; como se citó en Moreno, 2019) la influencia del suelo en la estructura dependerá del tipo de apoyo entre el suelo-cimentación-estructura, como lo afirma en el siguiente párrafo:

*En una cimentación profunda se garantiza la hipótesis de empotramiento porque se suele buscar un estrato rígido (roca) como soporte, por esta razón los asentamientos que se*



presentan son mínimos y despreciables en el comportamiento de los elementos; en la cimentación superficial, puede ocurrir asentamientos diferenciales, generando rotaciones que influyen directamente en el momento del elemento. (p. 4-5)

A continuación, se muestra la figura 2, en donde se puede visualizar la representación de los tipos de apoyo. La designación de la forma de cimentación dependerá de la clasificación del suelo en la que se apoya la estructura.



**Figura 2:** Tipos de apoyo entre la cimentación y el suelo

Fuente: Moreno (2019)

## 2.2. Características de la edificación

Para el análisis de estructuras que involucren la interacción entre el suelo y la estructura, se tiene mayor relevancia para suelos en sitios de terreno blando, en comparación a los que presentan base rígida, debido a que la rigidez del terreno apoyado es suficientemente alta para no admitir rotaciones o desplazamientos. Este fenómeno se ve representado en el periodo fundamental de la estructura interactuando con el suelo, ya que este siempre incrementa, porque el sistema acoplado tiene una flexibilidad mayor que la de la estructura supuesta con base rígida (Jennings y Bielak, 1973; Veletsos y Meek, 1974).

Aún no se han desarrollado criterios prácticos confiables para evaluar el incremento o la reducción en las demandas de ductilidad de sistemas suelo-estructura con respecto a los valores que se tendrían para la estructura supuestos con base rígida. En consecuencia, actualmente no es posible determinar con sencillez la resistencia de fluencia de un sistema acoplado que se requiere limitar la demanda de ductilidad a una ductilidad disponible especificada. Solamente se ha demostrado que la ductilidad nominal del sistema acoplado se reduce (Rosenblueth y Resendiz, 1988; Perez-Rocha y Avilés, 1996)

La norma peruana es una de las que simplifica la consideración del efecto e interacción suelo-estructura, por lo que permite diseñar y analizar sísmicamente una estructura con base fija y los sótanos de manera independiente. Sin embargo, existen un conjunto de características que dan un primer indicio de que esta simplificación no representa el verdadero comportamiento de la estructura. Por ejemplo, Willford et al. (2008), explican que, en edificaciones de gran altura, con cimientos que suelen ser masivos y ubicados a gran profundidad, es prudente evaluar el efecto de una estructura en su totalidad considerando las respuestas del sistema suelo-cimentación-estructura; esto debido a que dependerá del tipo de suelo que este llegue al rango no lineal en las máximas demandas sísmicas. Parámetros como la altura de la edificación, profundidad de sótanos y cimentación, tipo de suelos, son algunas de las características que influyen al verdadero comportamiento de la estructura en comparación al modelo tradicional de diseño que no considera los sótanos para el análisis sísmico.

Además, al estudiar este fenómeno se menciona que la geometría de la estructura y la variabilidad del terreno, el cual presenta formas e inclinaciones irregulares, generan complicaciones para encontrar un solo resultado analítico general en sistemas suelo-estructura; esto debido a que se producen efectos importantes si se compara con un sistema empotrado en la base, por ejemplo, la reducción de la frecuencia natural, el aumento del amortiguamiento y las derivas de una estructura con masa y rigidez definida (Jurado, 2012).

Del mismo modo, el ingeniero Christian Ledesma menciona que cuando se diseña considerando sótanos, existe un contraste de rigidez entre las edificaciones de gran altura (torres) y los sótanos subterráneos (estructura rígida en un medio como el suelo); lo cual genera esfuerzos adicionales en la base de la torre, mayores en comparación a si se diseñase de manera convencional de empotramiento en la base de la estructura. (Canal dic uchile, 2021, 52m15s). Además, durante el seminario presentado por el ingeniero Ledesma sobre sus investigaciones de la interacción suelo-estructura, resalta el tipo de suelo como uno de los factores más influyentes en las respuestas de la estructura que cambia el análisis sísmico, estructural y geotécnico de la edificación.

De manera general, Avilés y Pérez (2004) plantean durante su investigación “Bases para las nuevas disposiciones reglamentarias sobre interacción dinámica suelo-estructura” que las respuestas dependerán de la combinación de parámetros críticos que se requieren analizar cuando se analiza sísmicamente la estructura en su totalidad. Parte de estos parámetros son la relación de periodos de la estructura y el sitio, esbeltez de la estructura, enterramiento y tipo de cimentación, profundidad y tipo del estrato, entre otros. Estos conjuntos de consideraciones son tomadas en cuenta en los modelos actuales que representan la interacción suelo estructura y el resultado del análisis sísmico, demostrando las distorsiones entre los resultados al diseñar con empotramiento en la base o considerando el efecto de los sótanos como parte del análisis sísmico de la estructura en su totalidad.

Por último, se tiene una característica de la estructura que es estudiada por su relación con las demandas sísmicas, la cual tiene mayor nivel de investigación si se opta por considerar la interacción suelo-estructura. Esta característica se presentará si un

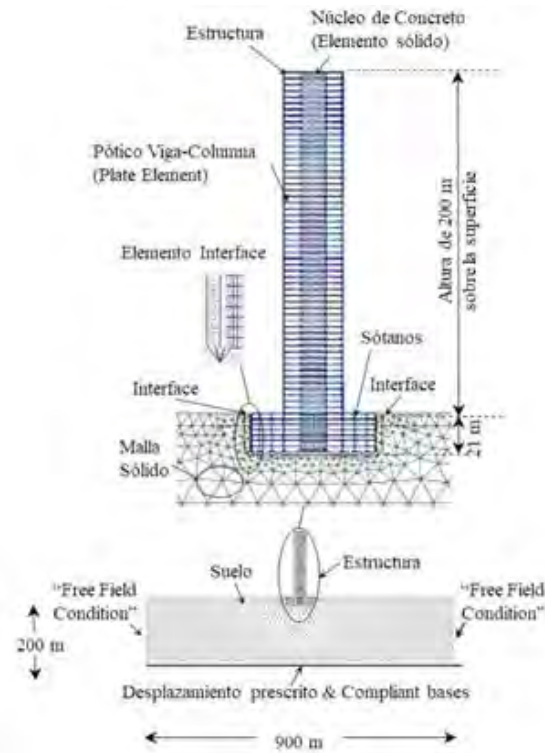
proyecto opta por uno de los distintos sistemas de aislamiento sísmico, los cuales responden de manera diferente cuando se considera el efecto de analizar sísmicamente al suelo y estructura. Por ejemplo, al compararse un sistema con péndulos de fricción con un sistema pendular con amortiguamiento, estos desarrollan mayores desplazamientos laterales al considerarse el efecto de la interacción suelo estructura; además, tienden a generar mayores cortantes en la base de la estructura, impactando directamente en el costo (Tena, 2020). Al implementarse algún tipo de sistema de aislamiento sísmico, este no implica que el diseño de la estructura, aislamiento y subestructura (sótano) se desarrolle de manera independiente, debido a la interacción suelo estructura.



### **CAPÍTULO 3: PARÁMETROS CRÍTICOS AL CONSIDERAR SÓTANOS EN EL ANÁLISIS SÍSMICO**

Dentro del análisis sísmico de una edificación, es importante reconocer que no es una práctica común considerar la interacción suelo-estructura en el modelo, a pesar de contar con las herramientas necesarias para ello. Al mismo tiempo, diversas investigaciones dedicadas a estudiar el comportamiento de una estructura con sótanos y la interacción con el terreno, tienden a mantenerse en un entorno controlado para modificar una de las variables de análisis. Este procedimiento, como método de investigación, permite observar cómo varía el comportamiento considerando o no la interacción suelo-estructura; sin embargo, para poder aplicarse dentro de un análisis complejo de una estructura real, es necesario considerar el conjunto de parámetros críticos y la relación que guardan entre ellos.

Otra herramienta que permite identificar los parámetros críticos al considerar sótanos en el análisis sísmico son los modelos desarrollados para obtener el comportamiento real de la estructura. Modelos matemáticos y computacionales requieren de las características del suelo, estructura y sismo para poder obtener un resultado sobre el comportamiento de la estructura. Un ejemplo de estos es el modelamiento por elementos finitos, que indica que el suelo puede representarse como un conjunto de resortes dentro de un área de acción y con una rigidez determinada por el propio entorno.



**Figura 3:** *Modelo Suelo-Cimentación-Estructura a través de Plaxis 2D considerando elementos finitos*  
Fuente: Pinto y Ledezma (2019)

De esta forma, para poder determinar cuando será necesaria la consideración de sótanos en el análisis sísmico, se describirán aquellos factores hayan demostrado ser determinantes cuando se compara un sistema diseñado con empotramiento en la base y un sistema considerando interacción suelo-estructura, y la relación que guardan con otros parámetros de la edificación, como la rigidez o el periodo.

### 3.1. Parámetros del suelo

#### 3.1.1. Análisis en suelo flexible

El análisis de la interacción suelo estructura se debe a que existe variabilidad de respuestas antes los efectos dinámicos del suelo y de la estructura. Sin embargo, la aplicación del análisis dinámico en los cálculos de diseño se vuelve complicada, ya que los parámetros que influyen en los resultados son poco precisos. Por ello, se considera

que el análisis dinámico de la interacción del suelo-estructura se realice en casos críticos como lo es en edificaciones con sótanos en suelos flexibles. Este tipo de suelo reduce las fuerzas sísmicas por lo que incrementa el periodo de la estructura en un evento sísmico. Debido al incremento del periodo la estructura está expuesta a que falle por asentamiento diferencial provocando movimientos de balanceo. Asimismo, se incrementa la distorsión de la estructura cuando se considera un análisis de interacción suelo estructura como se muestra en la figura 2 y figura 3.

Por otro lado, según la norma ASCE 7-16 (2017, pg 388 ), el nivel de la base de la estructura debe ubicarse en la misma cota donde entran y salen las fuerzas sísmicas del edificio. Por ello, debido a que en los suelos flexibles llegan a comprimirse lateralmente para transmitir fuerzas sísmicas cerca del nivel del suelo, se considera un nivel bajo la rasante, preferiblemente cerca al estrato de apoyo de cimentación.

Para evaluar los efectos dinámicos en la interacción suelo estructura se puede utilizar los métodos mencionados en el capítulo anterior: análisis directo y enfoque de la subestructura.

### **3.1.2. Parámetros para determinar el perfil del suelo**

A partir de las consideraciones que realiza la Norma E.030, se muestran los siguientes perfiles de suelo:

- Perfil Tipo S0: Roca Dura
- Perfil Tipo S1: Roca o Suelos Muy Rígidos
- Perfil Tipo S2: Suelos intermedios (Suelo medianamente rígido)
- Perfil Tipo S3: Suelos Blandos (Suelo flexible)
- Perfil Tipo S4: Condiciones Excepcionales (Suelos excepcionalmente flexibles)

Asimismo, para la determinación de los perfiles de suelo se necesitan los siguientes parámetros obtenidos en el estudio de suelos previo:

- $V_s$ : Velocidad de ondas de corte

- N60: Número de golpes del ensayo de Penetración Estándar (SPT), suelos granulares
- Su: Resistencia a corte no drenada, suelos cohesivos

A continuación, se muestra una tabla resumen para la determinación del tipo de suelo:

**Tabla 2**  
*Clasificación de los perfiles de suelo*

Perfil	$\bar{V}_s$	$\bar{N}_{60}$	$\bar{S}_u$
S0	>1500 m/s	-	-
S1	500 m/s a 1500 m/s	> 50	>100 kPa
S2	180 m/s a 1500 m/s	15 a 50	50 kPa a 100 kPa
S3	< 1500 m/s	< 15	25 kPa a 50 kPa
S4	Clasificación basada en EMS		

Fuente: NTE E.030 Diseño Sismorresistente, 2018.

### 3.2. Zonificación

En la actualidad, la zonificación del territorio nacional se encuentra dividido en cuatro zonas. Esta se propuso en base a “la distribución espacial de la sismicidad observada, las características generales de los movimientos sísmicos y la atenuación de éstos con la distancia epicentral, así como en la información neotectónica”(Norma E.030, 2019). Para una mayor comprensión, estas zonas se muestran en la siguiente figura.





**Figura 4:** Zonas sísmicas del territorio peruano

Fuente: Norma técnica E.030 (2019)

De la figura anterior se puede observar que las mayores aceleraciones horizontales se localizan en la zona costera y va disminuyendo a medida que se aleja del litoral peruano. Estas aceleraciones corresponden al “suelo rígido con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años” (Norma E.030, 2019).

El empleo de estos parámetros Z, que es la aceleración máxima horizontal expresado como una fracción de la aceleración de la gravedad, es obligatorio para el diseño de edificaciones comunes, lo cual toma diversos valores de acuerdo a la ubicación del proyecto. Por lo tanto, es importante evaluar cómo se comportará el suelo en contacto con las edificaciones en el momento de someterse a estas aceleraciones sísmicas.

Los suelos presentan propiedades mecánicas, geotécnicas y dinámicas; esta última “manifiesta el comportamiento del suelo ante la acción de ondas sísmicas modificando su amplitud, duración y contenido de frecuencias” (Ríos, 2018, p.4).

La interacción suelo-estructura dependerá del tipo del suelo y está a su vez de la magnitud de las aceleraciones. Por lo tanto, la zonificación está estrechamente relacionada para decidir qué tipo de modelos se emplea para el análisis de la edificación (empotrado en la base o considerando la influencia del suelo). Asimismo, para un suelo determinado con propiedades pobres a conservar su estado inicial ante cualquier vibración son aquellas que son susceptibles a cambiar las condiciones de interacción suelo-estructura. Este cambio es más notable cuando las aceleraciones sísmicas son mayores, por lo que en la zona 4 y 3 es indispensable incluir en el análisis la interacción del suelo.

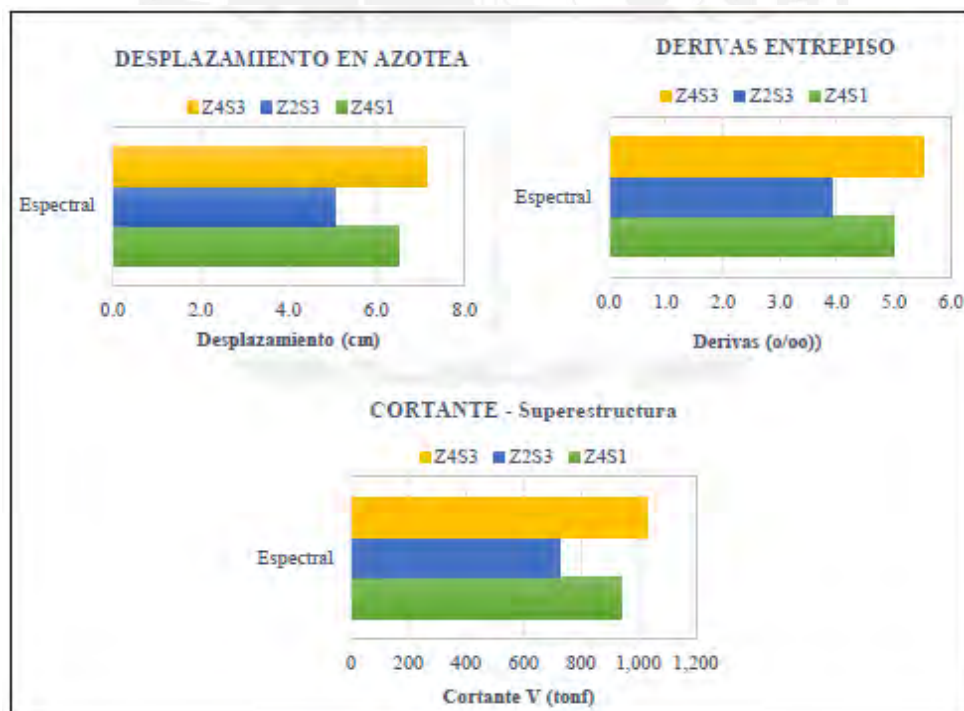
Complementando al párrafo anterior, el análisis del suelo-estructura se propone a realizarse bajo las siguientes condiciones: en la zona 4, se debe evaluar para suelos intermedio (S2), suelo blando (S3) y suelo con condiciones excepcionales (S4). En cambio, para la zona 3 se propone evaluar para estos dos últimos perfiles de tipos de suelos. Estas propuestas se realizan porque en los métodos tradicionales (empotrado en la base) se tiende a considerar con valores mayores a las fuerzas cortantes para una zona de mayor aceleración y suelos de mala calidad. Sin embargo, en la realidad esto no suele ocurrir así, ya que al momento de incluir el análisis del suelo-estructura por lo general el período de las estructuras de mediana altura aumenta y las fuerzas cortantes disminuyen. A continuación, se muestra una tabla del factor  $ZS$ , en donde se visualiza que los valores se elevan para zonas con aceleraciones mayores y bajas calidades de suelos.

**Tabla 3:**  
Factor ZS

Factor ZS	S1	S2	S3
Z4	0.6750	0.7095	0.7425
Z3	0.5250	0.6045	0.6300
Z2	0.3750	0.4500	0.5250
Z1	0.1500	0.2400	0.3000

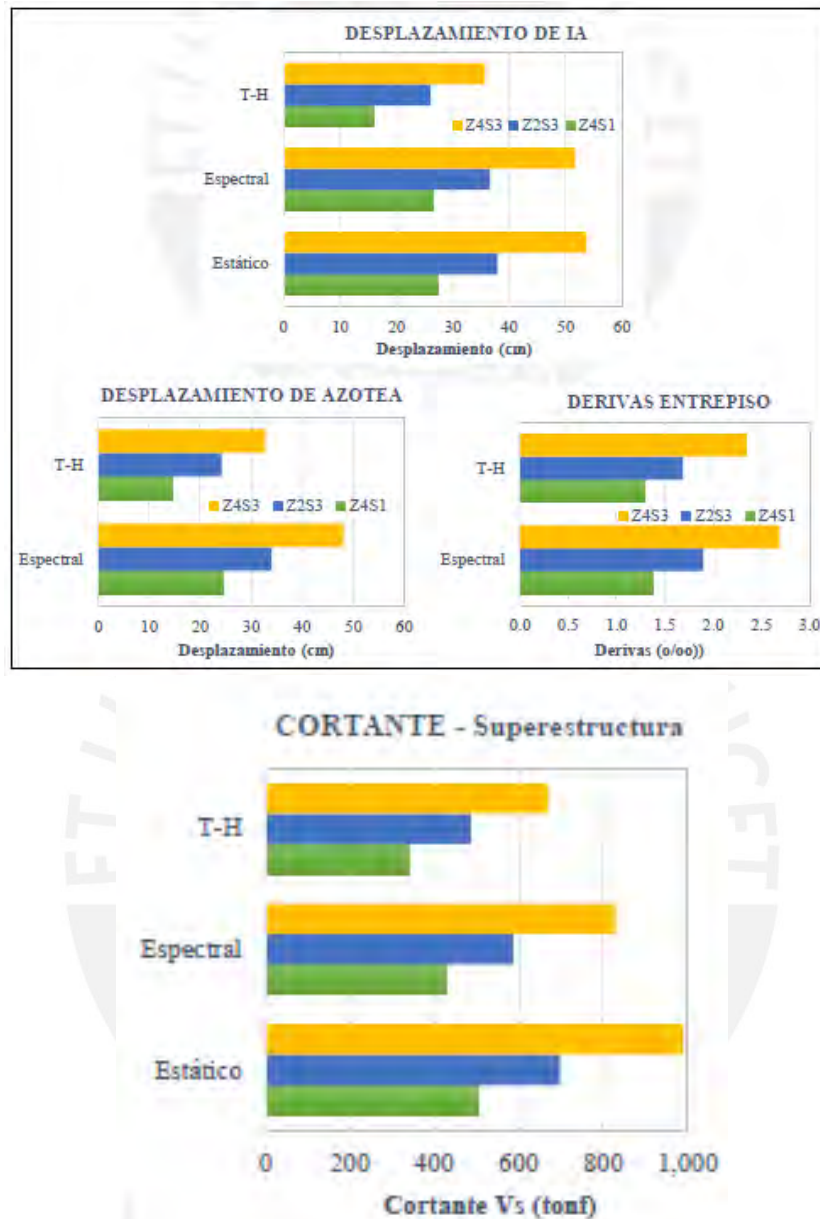
Fuente: Solorzano (2019)

Estos factores son directamente proporcionales a la fuerza basal considerada para el diseño de la edificación, por lo que para suelos rígidos y zonas con aceleraciones sísmicas bajas pueden ser una buena estimación. Sin embargo, para suelos de baja calidad y con aceleraciones sísmicas altas estas condiciones iniciales son susceptibles a cambiar, por lo que las estimaciones teóricas iniciales son erróneas con los resultados reales. Estos argumentos se pueden notar en los resultados que serán mostrados por las siguientes imágenes tanto para modelos con base empotrada y amortiguados en su base.



**Figura 5:** Respuesta de las edificaciones de base empotrada

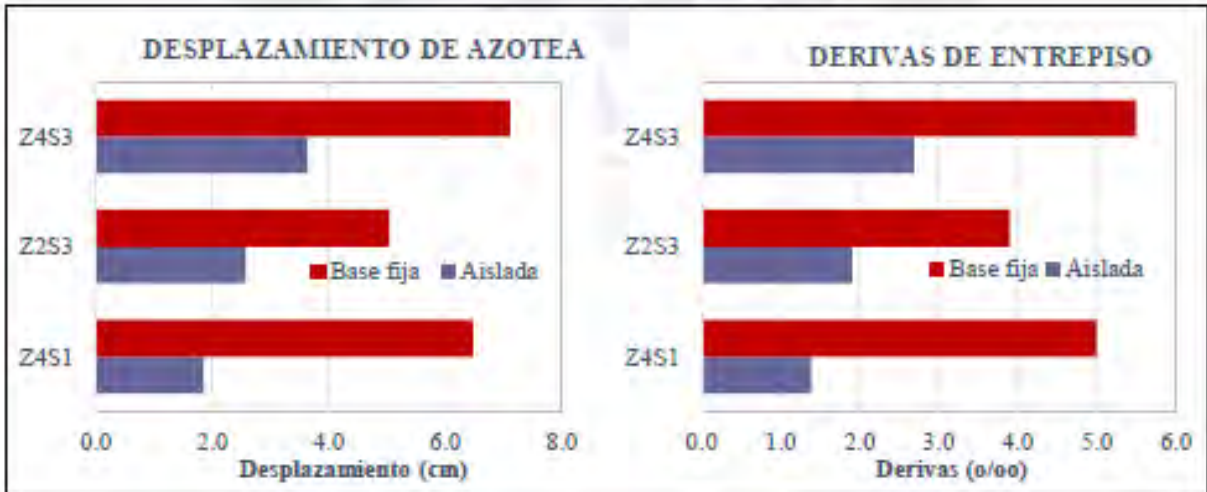
Fuente: Solórzano (2019)



**Figura 6:** *Respuesta de las edificaciones con modelos amortiguados en sus bases*

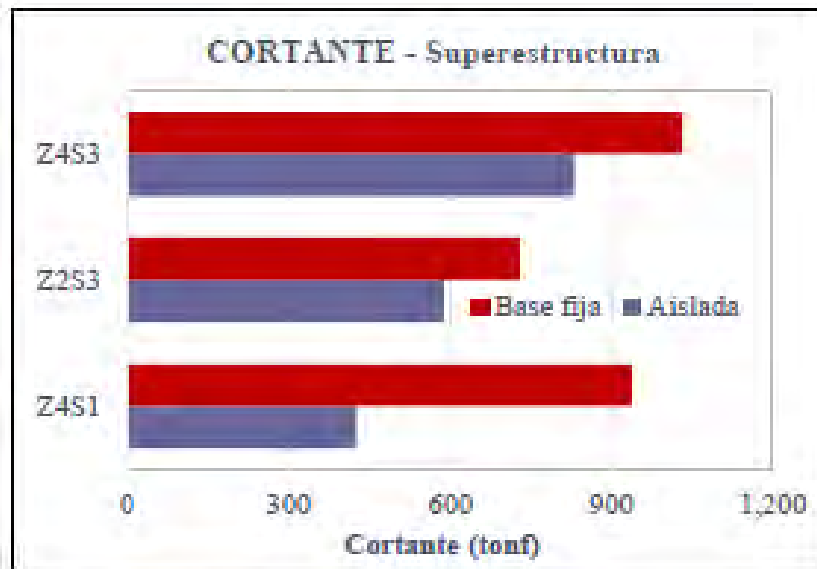
Fuente: Solórzano (2019)

A continuación, se muestran las gráficas de comparación entre las respuestas de modelos simplificados con bases empotrados y modelos más complejos considerando amortiguadores en su base equivalente al comportamiento del suelo.



**Figura 7:** Desplazamientos y derivas de edificaciones de base empotrada y aislada

Fuente: Solórzano (2019)



**Figura 8:** Fuerzas cortantes de las edificaciones de base empotrada y aislada

Fuente: Solórzano (2019)

### 3.3. Parámetros estructurales

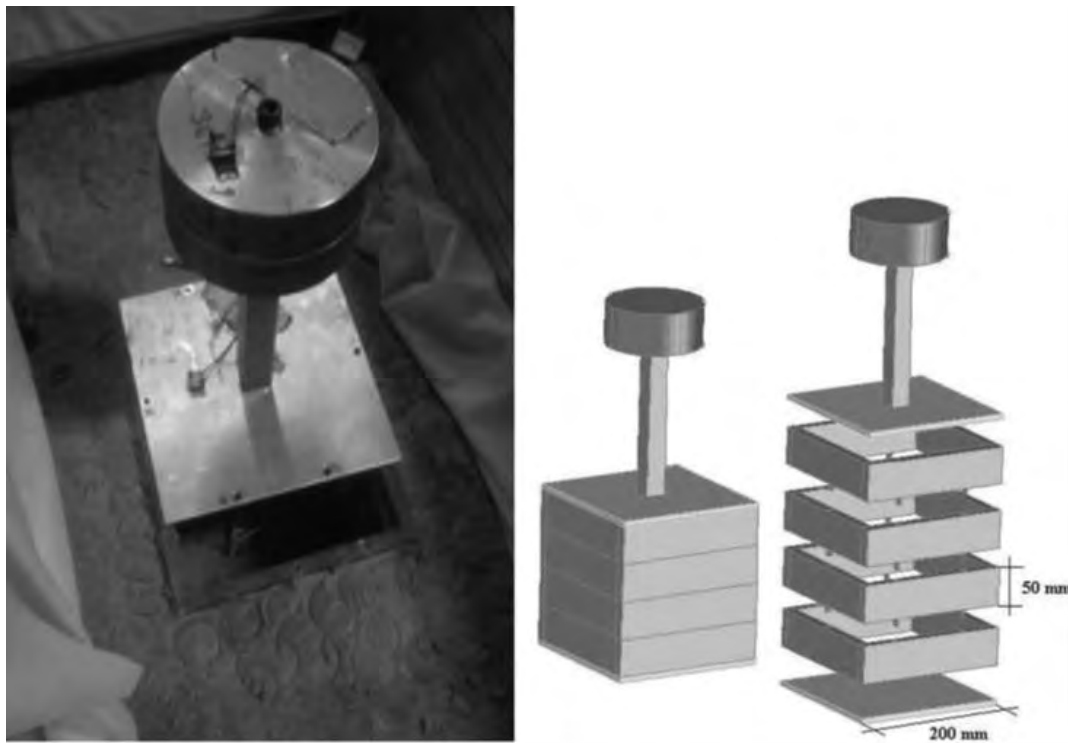
Las condiciones en las que se encuentra situada una edificación guardan relación con los efectos que se tendrán durante un sismo, esto no implica que las características o parámetros de la estructura no sean una condicionante al considerar la interacción suelo-estructura. Desde la etapa de concepción del proyecto, e incluso por estimación de la norma, es posible estimar el periodo de la estructura y amortiguamiento de la estructura; sin embargo, al considerar interacción suelo-estructura, tienen que ser considerados los efectos o variaciones mencionados por Jurado (2012) al cimentar sobre suelo blando:

- 1.- La frecuencia natural del sistema suelo-sótano- estructura será más baja que en el caso de la estructura empotrada en suelo rígido.
- 2.- El amortiguamiento del sistema suelo-sótano-estructura es generalmente mayor al sistema que considera solo la estructura.
- 3.- La existencia de mayores movimientos que en el caso de la estructura empotrada en suelo rígido.

Al considerar sótanos en el análisis sísmico, y sabiendo las variaciones de las características de la estructura en comparación al diseño tradicional, se podrán tomar las consideraciones necesarias en el diseño estructural. En otras palabras, las variables dentro del estudio de la interacción suelo-estructura y las condiciones del sismo o zonificación, permitirán que la relación entre estructura y sismo sea la adecuada; por ejemplo, sabiendo la relación entre el periodo estructural, que considere interacción suelo-estructura, y el periodo del sismo al estimar los desplazamientos laterales de la edificación.

Respecto a ello, Turan et al. (2013) evaluaron los efectos de la interacción suelo-estructura para dos edificios de periodo corto con diferentes niveles de sótano. El modelo utilizado fue una estructura simple de un solo grado de libertad con una fundación modular, como se muestra en la Figura 9, diseñada para permitir la consideración de estructuras con diferentes niveles de sótanos. La fundación de la

estructura se empotró sobre un capa de arcilla rígida artificial, la cual se compactó en un contenedor laminar a través de una mesa vibratoria unidimensional.



**Figura 9:** Esquema del modelo de un solo grado de libertad con diferentes niveles de sótano

Fuente: Turan et al. (2013)

Los resultados experimentales mostraron que la relación entre el período efectivo del sistema suelo-estructura y el período de la estructura disminuyó para la estructura de período largo y aumentó para la estructura de período corto, con un empotramiento creciente.

Adicionalmente, se sabe que el comportamiento al diseñar la estructura con base fija tiene diferencias si se compara con una estructura diseñada en conjunto con los sótanos; estas distorsiones en los resultados serán aún mayores cuando se analicen edificios de gran altura. El cambio de rigidez entre el sistema estructural del edificio, denominado como torre, y el sistema de la subestructura, conjunto entre sótanos y suelo, requiere de un análisis con mayor precisión, debido a que se generan esfuerzos adicionales en la base de la edificación. Este fenómeno suele darse en edificios altos debido a que la mayoría se diseña con grandes sótanos subterráneos, dependiendo el uso o tipo de edificación, y la altura del edificio.

Cabe resaltar que, Avilés y Pérez-Rocha (1997) investigaron los efectos de sitio y la interacción suelo-estructura durante el terremoto de México de 1985. Encontraron que estos efectos fueron mayores para las estructuras altas y esbeltas que para las estructuras bajas y desproporcionadas del mismo período. Además, observaron una relación inversamente proporcional entre los efectos de la interacción suelo-estructura y la profundidad de la cimentación. A medida que la profundidad de la cimentación aumentaba, los efectos de la interacción suelo-estructura disminuyeron.





## CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

Se ha identificado aquellas normas que mencionan e integran la interacción suelo-estructura en el análisis sísmico y se pudo determinar que no se plantea un método general de diseño que considere sótanos como parte integral del sistema. A pesar de ello, se desarrollan modelos numéricos y computacionales que estiman el comportamiento real de la estructura con gran precisión, teniendo en cuenta diversos parámetros como el suelo, la rigidez de la estructura y el sismo.

Es importante mencionar que los factores que hacen fundamental la consideración de sótanos interactúan entre sí como respuesta al sismo. Es necesario realizar el análisis dinámico de la interacción de suelo estructura en suelos flexibles debido a que la estructura tiene mayor tendencia a fallar por asentamiento diferencial durante un evento sísmico. Asimismo, para determinar la ubicación de la base de una edificación con sótanos se considera un nivel bajo la rasante y dependerá el tipo de suelo y cimentación que se considere la interacción suelo-estructura.

Del mismo modo, las características de la estructura determinarán el impacto de haber diseñado considerando sótanos en el análisis. El sistema suelo-cimentación-sótano tiende a considerarse de mayor rigidez y complejidad que la estructura que se analiza como empotrada en la base. El análisis requiere de mayor atención en caso la diferencia entre las rigideces de la estructura y el sistema suelo-sótanos sea mayor, ya que implica diversas consideraciones de diseño.

Cabe resaltar que la interacción suelo-estructura puede disminuir el cortante base, las fuerzas laterales y los momentos de volteo experimentados por una estructura durante los terremotos. Sin embargo, aumenta los desplazamientos laterales y las fuerzas secundarias asociadas con los efectos P-delta. Por lo tanto, se debe tener especial cuidado con los efectos de la interacción suelo-estructura dado que aún existe desconocimiento del tema entre los profesionales de diseño.

Por último, es indispensable considerar el análisis del suelo-estructura para las edificaciones de mediana y gran altura en la zonificación de la zona 3 y 4 del territorio peruano. Este se debe realizar sobre todo cuando las edificaciones se encuentran en aquellos suelos con propiedades mecánicas y dinámicas pobres como son los suelos de tipo S3 y S4, ya que estos suelos tienden a cambiar sus propiedades iniciales ante vibraciones considerables.

#### **4.2. Recomendaciones**

Si bien es un método adecuado que las investigaciones opten por mantener parámetros controlados y modificar una de las variables en los modelos numéricos que estiman el comportamiento estructural, se recomienda que bajo el mismo objeto de estudio se haga énfasis en las relaciones entre variables y cómo interactúan ante un sismo. De este modo, tras haber identificado los parámetros que hacen necesaria la consideración de sótanos en el análisis y cómo se relacionan entre ellos, se podrán tomar las consideraciones necesarias en el modelamiento para que el comportamiento de la estructura sea el adecuado.

A pesar de las consideraciones planteadas en esta investigación, la complejidad de la interacción suelo-estructura abarca investigaciones tanto estructurales como geotécnicas, se recomienda tomar como temas de estudio las respuestas que se presentan cuando se tienen edificaciones existentes. Esto debido a que cada estructura tiene un área de acción en el terreno, donde distribuyen los esfuerzos de la cimentación y se disipan a través de su entorno. De la misma forma se pueden plantear casos especiales de interacción suelo estructura, como el utilizar rellenos en el terreno, la construcción de sótanos en suelo rocoso o el uso de pilotes en la cimentación.

Se recomienda estudiar la incorporación en el Código Sísmico Peruano de mapas de ordenadas espectrales de las microzonificaciones. Esto hará posible tener formas espectrales propias de cada región asociadas a la misma probabilidad de excedencia. De esta forma, e identificando el tipo de suelo, se podrán determinar las zonas más críticas donde considerar la interacción suelo-estructura repercuta en mayores discrepancias de considerar el método tradicional de diseño.

Por último, se recomienda revisar la Norma técnica de Diseño Sismorresistente (2019) con la finalidad de incluir nuevos acápite de la metodología del análisis de la influencia del suelo en la estructura. Pero antes, se recomienda que la norma establezca nuevos capítulos, ya que en estos se deben indicar a partir de qué parámetros característicos del suelo y la estructura es necesario realizar el análisis de interacción dinámica suelo-estructura en edificaciones como un sustituto de un análisis simplificado (empotrado en su base).



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society of Civil Engineers. (2017). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-16). ASCE Standard. <https://doi.org/10.1061/9780784414248>

Athanasopoulou, A., Fardis, M., Pinto, P., Aucun, B., Tsionis, G., Somja, H., Plumier, A., Pecker, A., Franchin, P., Carvalho, E., Fajfar, P., Degee, H., Kreslin, M., Bisch, P., & European Commission. Joint Research Centre. (2012). *Eurocode 8: seismic design of buildings - Worked examples*. Publications Office. [https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/WS\\_335/report/EC8\\_Seismic\\_Design\\_of\\_Buildings-Worked\\_examples.pdf](https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/WS_335/report/EC8_Seismic_Design_of_Buildings-Worked_examples.pdf)

Avilés, J., & Pérez-Rocha, L. E. (1997). Site effects and soil-structure interaction in the valley of Mexico. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17(1), 29–39. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(97\)00027-4](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(97)00027-4)

Avilés, J. & Pérez, L. (2004). Bases para las nuevas disposiciones reglamentarias sobre interacción dinámica suelo-estructura. *Revista de Ingeniería sísmica, Volumen 71, pp 1-36*. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61807101>

Canal dicuchile. (27 de julio de 2021). Seminario de Geotecnia: Interacción Suelo-Estructura en Edificios Altos con Subterráneos. [Archivo de Video]. Youtube. [https://www.youtube.com/watch?v=b7nQyt\\_PUBA&t=3655s](https://www.youtube.com/watch?v=b7nQyt_PUBA&t=3655s)

Hermosillo A, Deméneghi A., Legorreta, N. y Sanginés H (2016). Interacción Suelo – Estructura de una Losa de Cimentación en un Suelo Friccionante. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C. [https://www.smig.org.mx/admArticulos/eventos/27\\_XXVIII\\_Reunion\\_Nacional\\_de\\_Ingenieria\\_Geotecnica/45\\_XXVIII\\_Reunion\\_Nacional\\_de\\_Ingenieria\\_Geotecnica/119\\_Interaccion\\_sueloestructura/I18HEAA\\_1.pdf](https://www.smig.org.mx/admArticulos/eventos/27_XXVIII_Reunion_Nacional_de_Ingenieria_Geotecnica/45_XXVIII_Reunion_Nacional_de_Ingenieria_Geotecnica/119_Interaccion_sueloestructura/I18HEAA_1.pdf)

Jennings, P. C., & Bielak, J. (1973). DYNAMICS OF BUILDING-SOIL INTERACTION. In *Bulletin of the Seismological Society of America* (Vol. 63, Issue 1). [Jennings, P. C., & Bielak, J. \(1973\). DYNAMICS OF BUILDING-SOIL INTERACTION. In Bulletin of the Seismological Society of America \(Vol. 63, Issue 1\).](#)

Jurado, C. (2012). *Problemas de interacción suelo estructural en cimentaciones y muros de contención. Influencia de los fenómenos de despegue y deslizamiento*. [Tesis doctoral]. Archivo Digital UPM, Universidad Politécnica de Madrid. <https://oa.upm.es/13731/>

Ministerio del ambiente, Instituto Geofísico del Perú-IGP (2020). Procedimiento para aplicación de la prospección sísmica para los estudios de zonificación geofísica de los suelos en áreas urbanas. [Ensayos Geofísicos \(Prospección Eléctrica y Sísmica\) en las zonas afectadas por deslizamientos en la ciudad de Huancabamba \(cenepred.gob.pe\)](#)

Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento (2018). *Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente*. Recuperado de <https://www.gob.pe/institucion/sencico/informes-publicaciones/887225-normas-del-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>

Moreno, B. (2019). *Propuesta de metodología para el análisis de interacción dinámica suelo-estructura en edificios de mediana altura* [Tesis de maestría]. Repositorio institucional de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/4603>

Naeim, F., Tilelyioglu, S., Alimoradi, A. & Stewart, J. (2008). Impact of foundation modeling on the accuracy of response history analysis of a tall building. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/238722652\\_Impact\\_of\\_foundation\\_modeling\\_on\\_the\\_accuracy\\_of\\_response\\_history\\_analysis\\_of\\_a\\_tall\\_building](https://www.researchgate.net/publication/238722652_Impact_of_foundation_modeling_on_the_accuracy_of_response_history_analysis_of_a_tall_building)

Pérez-Rocha, L., & Avilés, J. (1996). Non-linear response of soil-structure systems. Proc.

Pinto, F. & Ledezma, C. (2019). Interacción suelo-estructura en edificios de gran altura con subterráneos en Santiago, Chile. *Obras y Proyectos Revista de Ingeniería Civil, volumen 25*, pp 66-77. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132019000100066>

Ríos León, J. (2018). *Evaluación del comportamiento dinámico del suelo en Lima y Callao utilizando el método del cociente espectral H/V* [Tesis de maestría]. Repositorio institucional de la Pontificia Universidad Católica del Perú. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/12212>

Rosenblueth, E y D Reséndiz (1988), “Disposiciones reglamentarias de 1987 para tener en cuenta interacción dinámica suelo-estructura”, Series del Instituto de Ingeniería No. 509, Universidad Nacional Autónoma de México. <https://smis.mx/index.php/RIS/article/view/334>

Solórzano Flores, E. (2019). *Influencia de las condiciones del suelo en el comportamiento estructural de un hospital con aislamiento sísmico en la base* [Tesis de maestría]. Repositorio institucional de la Pontificia Universidad Católica del Perú. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/14915>

Stewart, J., Crouse, C. B., Hutchinson, T., Lizundia, B., Naeim, F., & Ostadan, F. (2012). *Soil-Structure Interaction for Building Structures*. Grant/Contract Reports (NISTGCR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. [https://tsapps.nist.gov/publication/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=915495](https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=915495)

Tena, A. (2020). Aspectos a considerar en el diseño de estructuras con aislamiento sísmico en suelos firmes y blandos. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras, Volumen 25, Núm. 3*, pp 333-365. Recuperado de <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/riie/article/view/1690>

Turan, A., Hinchberger, S. D., & el Nagggar, M. H. (2013). Seismic soil–structure interaction in buildings on stiff clay with embedded basement stories. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(8), 858–873. <https://doi.org/10.1139/cgj-2011-0083>

Veletsos, A.S. and Meek, J.W. (1974), "Dynamic behavior of building-foundation systems", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3, 121-138.  
<https://doi.org/10.1002/eqe.4290030203>

Willford, M., Whittaker, A. & Klemencic, R. (2008). Recommendations for the Seismic Design of High-Rise Buildings. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/237293607\\_Recommendations\\_for\\_the\\_Seismic\\_Design\\_of\\_High-Rise\\_Buildings](https://www.researchgate.net/publication/237293607_Recommendations_for_the_Seismic_Design_of_High-Rise_Buildings)

