

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PROPUESTA PRELIMINAR DE MÉTODO DE ANÁLISIS DE
INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA PARA SUELOS
PERUANOS**

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

AUTORA:

Abanto Oblitas, Rosa Maricarmen

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

AUTORES:

Cisneros Meneses, Loiwi Klein

Gomez Cordova, Giancarlo

Díaz Esquivel, Christian Manuel

Rojas Peralta, Pablo Alberto Sebastian

ASESOR:

Ucañan Diaz, Robinson

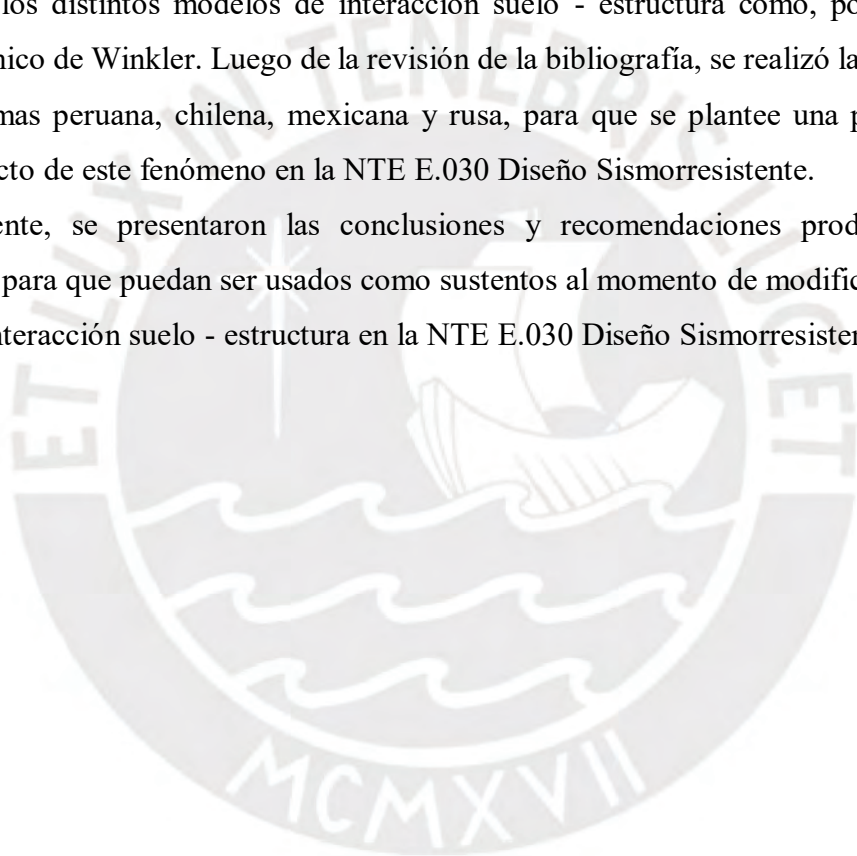
Lima, Diciembre, 2020

Resumen

El presente trabajo de investigación comprende la elaboración de una propuesta preliminar para el análisis de interacción suelo - estructura (ISE) para suelos peruanos en base a la revisión de normas internacionales e investigaciones relacionadas a este tema. Es conocido que ninguna de las normas peruanas incluye el efecto del suelo con la estructura y que nuestro país cuenta con una alta actividad sísmica, lo cual podría generar que se eliminen algunos efectos perjudiciales al momento de realizar un diseño sismorresistente si es que se considera esta interacción.

Como parte de la metodología, se empezó realizando una recopilación de conceptos generales de los distintos modelos de interacción suelo - estructura como, por ejemplo, el modelo dinámico de Winkler. Luego de la revisión de la bibliografía, se realizó la comparación entre las normas peruana, chilena, mexicana y rusa, para que se plantee una propuesta que incluya el efecto de este fenómeno en la NTE E.030 Diseño Sismorresistente.

Finalmente, se presentaron las conclusiones y recomendaciones producto de esta investigación para que puedan ser usados como sustentos al momento de modificar e incluir el efecto de la interacción suelo - estructura en la NTE E.030 Diseño Sismorresistente.



Índice

Resumen	i
Lista de figuras.....	iv
Lista de tablas	v
Lista de fórmulas	vi
Capítulo 1. Generalidades.....	1
1. 1. Introducción	1
1. 2. Justificación e hipótesis	1
1. 3. Alcance	1
1. 4. Objetivos.....	2
1. 5. Metodología	2
Capítulo 2. Revisión de la literatura.....	3
2. 1. Interacción suelo - estructura	3
2. 2. Interacción suelo - estructura	4
2. 2. 1. Zapatas aisladas	4
2. 2. 2. Zapatas combinadas	4
2. 2. 3. Zapatas conectadas.....	5
2. 2. 4. Cimientos corridos	5
2. 2. 5. Losas de cimentación	6
2. 3. Modelo de interacción de suelo - estructura	6
2. 3. 1. Modelo dinámico D.D. Barkan - O.A. Savinov.....	6
2. 3. 2. Modelo dinámico Winkler.....	8
2. 3. 3. Modelo dinámico V.A. Ilichev	12
2. 3. 4. Modelo Dinámico A.E. Sargsian	14
Capítulo 3. Desarrollo de la investigación	16
3. 1. Análisis y Comparación entre la Normas Técnicas	16
3. 1. 1. Normas peruanas.....	16
3. 1. 2. Norma Chilena 433.OF1996-Diseño Sísmico de edificios	19
3. 1. 3. Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (2017)	21

3. 1. 4. Norma rusa SNIP 2.02.05-87.....	28
3. 2. Propuesta de implementación de metodología para el análisis de interacción suelo-estructura.....	34
Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones	39
4. 1. Conclusiones	39
4. 2. Recomendaciones.....	40
Capítulo 5. Bibliografía	41

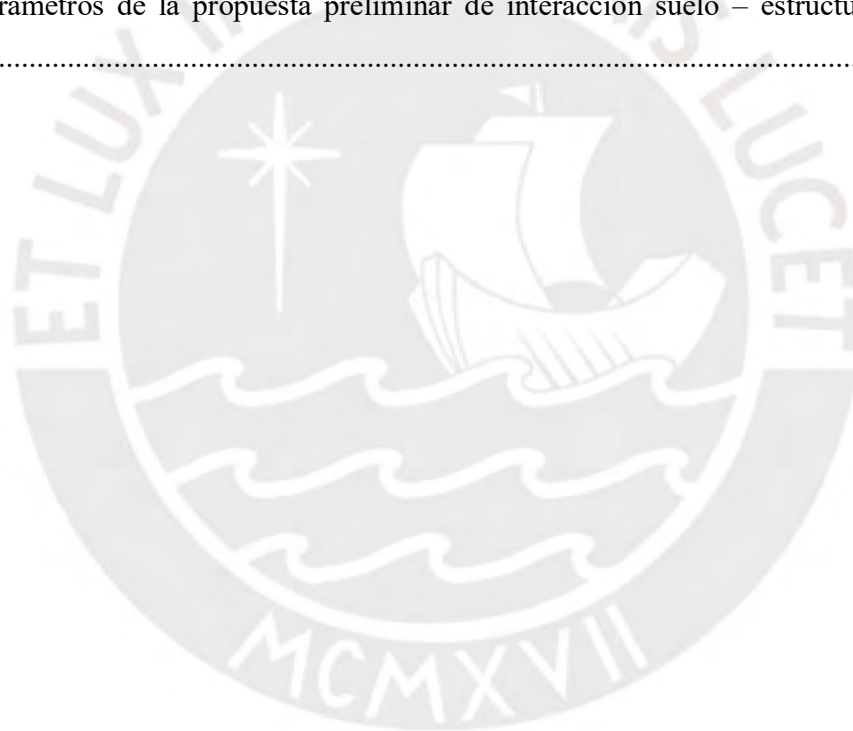


Lista de figuras

Figura 2.1. Zapata aislada (Yepes, 2020)	4
Figura 2.2. Zapata combinada (Yepes, 2020).....	5
Figura 2.3. Zapata conectada (Yepes, 2020)	5
Figura 2.4. Modelo Dinámico Ilichev (Villareal, 2020).....	12
Figura 3.1. Zonas sísmicas del Perú (NTE E.030 Diseño Sismorresistente, 2018).....	17
Figura 3.2. Zonificación Sísmica de las regiones I-II-III-XV (Norma 433 Diseño sísmico de edificios, 2012).....	19
Figura 3.3. Zonificación Sísmica de las regiones IV-V-VI-VII-VIII-IX-X-XIV-Reg. Metropolitana (Norma 433 Diseño sísmico de edificios, 2012)	19
Figura 3.4. Zonificación Sísmica de las regiones XI-XII (Norma 433 Diseño sísmico de edificios, 2012).....	20
Figura 3.5. Regiones sísmicas de México (Normas Técnicas Complementarias de Diseño Sísmico, 2017).....	22
Figura 3.6. Zonificación del DF para fines de diseño por sismo (Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones, 2017).....	22
Figura 3.7. Rusia Europea, mapa A (SNIP, 2020)	29
Figura 3.8. Siberia, mapa A (SNIP, 2020)	29
Figura 3.9. Extremo-oriente rusa, mapa A (SNIP, 2020).....	29

Lista de tablas

Tabla 2.1. Valores de Co (Villareal Castro, 2017).....	8
Tabla 2.2. Valores de k30 propuestos por Terzaghi.....	11
Tabla 2.3. Valores de k30 propuestos por varios autores (Gesto de Dios, 2006)	11
Tabla 3.1. Clasificación de los perfiles de suelo (NTE E.030 Diseño Sismorresistente, 2018).....	18
Tabla 3.2. Clasificación sísmica de los suelos	20
Tabla 3.3. Tipos de perfil de suelo según norma rusa SNIP II-7-81 (2001)	30
Tabla 3.4. Resistencia de cálculo R para suelos grandes o de grano grueso norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987)	33
Tabla 3.5. Resistencia de cálculo R para suelos arenosos norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987)....	33
Tabla 3.6. Criterios de comparación para la propuesta	34
Tabla 3.7. Propuesta preliminar de interacción suelo – estructura para suelos peruanos.....	36
Tabla 3.8. Parámetros de la propuesta preliminar de interacción suelo – estructura para suelos peruanos.....	38



Lista de fórmulas

(2.1)	6
(2.2)	6
(2.3)	6
(2.4)	7
(2.5)	7
(2.6)	7
(2.7)	7
(2.8)	7
(2.9)	8
(2.10)	10
(2.11)	10
(2.12)	10
(2.13)	11
(2.14)	12
(2.15)	13
(2.16)	13
(2.17)	13
(2.18)	13
(2.19)	13
(2.20)	14
(2.21)	14
(2.22)	14
(2.23)	14
(2.24)	14
(2.25)	14
(2.26)	14
(2.27)	14
(2.28)	14
(2.29)	15
(2.30)	15
(3.1)	23
(3.2)	23
(3.3)	23
(3.4)	23

(3.5)	24
(3.6)	24
(3.7)	25
(3.8)	25
(3.9)	25
(3.10)	26
(3.11)	26
(3.12)	27
(3.13)	27
(3.14)	27
(3.15)	27
(3.16)	28
(3.17)	28
(3.18)	31
(3.19)	31
(3.20)	31
(3.21)	31
(3.22)	31
(3.23)	31
(3.24)	31
(3.25)	32
(3.26)	32
(3.27)	32
(3.28)	32
(3.29)	32
(3.30)	32
(3.31)	33
(3.32)	33
(3.33)	33
(3.34)	33
(3.35)	34
(3.36)	34
(3.37)	34
(3.38)	34

Capítulo 1. Generalidades

En el presente capítulo, se detalla el contexto del trabajo de investigación.

1. 1. Introducción

La presente investigación tiene el objetivo de realizar una propuesta preliminar para el análisis de interacción suelo - estructura (ISE) para suelos peruanos en base a la revisión exhaustiva de normas internacionales e investigaciones relacionadas a este tema.

La finalidad de este trabajo de investigación es sugerir que la NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018) tome en cuenta la influencia de este fenómeno para el análisis y diseño estructural de cimentaciones superficiales, porque se presentan esfuerzos adicionales en los elementos estructurales y asentamientos diferenciales si es que se considera esta interacción. Para ello, se enumeraron, compararon y adaptaron los diversos métodos de análisis de la ISE y se propuso un método de análisis de interacción suelo - estructura para suelos peruanos.

1. 2. Justificación e hipótesis

La NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018) no considera la interacción suelo - estructura en el análisis y diseño de elementos de concreto armado.

El Perú está situado en el cinturón del fuego, lo cual conlleva a una alta actividad sísmica y las placas se desplazan con una velocidad entre 1 cm a 6 cm por año. Esto evidencia que es necesario considerar el aporte dinámico y de amortiguamiento del suelo en el análisis sísmico.

Asimismo, los modelos empleados son una simplificación de la realidad; sin embargo, debido a la existencia de estos métodos de análisis de la ISE, se puede predecir eficientemente la respuesta de la estructura ante sollicitaciones sísmicas considerando las propiedades del suelo en el cual se está cimentando.

1. 3. Alcance

El presente trabajo de investigación abarca el estudio de la influencia que tiene los suelos de fundación en la estructura, así como una comparación entre las normas técnicas mexicana, chilena, peruana y rusa. Asimismo, se brindó una serie de recomendaciones de tal forma que la NTE E.030 Diseño Sismorresistente tome en cuenta dicho fenómeno.

Debido a que el presente trabajo contiene un amplio contenido teórico, el principal limitante fue la serie de asunciones que implican cada uno de ellos. Por ejemplo, el modelo dinámico de Winkler, que sirve para representar la interacción suelo - estructura, asume que el suelo es completamente uniforme al igual que sus propiedades físicas y mecánicas.

1. 4. Objetivos

Principal

- Elaborar una propuesta preliminar del método de análisis de interacción suelo estructura para los suelos peruanos

Secundarios

- Evaluar y comparar las principales diferencias entre las normas técnicas (mexicana, chilena y rusa) con respecto a la NTE E.030 Diseño Sismorresistente
- Identificar los principales modelos de interacción suelo y estructura que representen de mejor manera su comportamiento

1. 5. Metodología

El presente trabajo de investigación partió de la recopilación de conceptos generales e investigaciones relevantes relacionadas a la descripción de modelos de interacción suelo – estructura y de las normas de diseño de distintos países; tales como, la norma chilena, la norma mexicana y la norma rusa.

Posterior a la recopilación, se procedió a describir los aspectos generales de cada uno de los modelos contemplados. Para cada uno de ellos, se recopilaron las hipótesis de las que parten para desarrollar los conceptos del modelo y las principales expresiones que emplean para describir la interacción suelo - estructura.

Así mismo, para realizar la propuesta de implementación de modelos de ISE en la norma peruana, se realizó la comparación de los conceptos que emplean las normas nacionales con los de otras normas internacionales. Entre los conceptos comparados y que influyen en la obtención de los resultados se encuentran: la categorización de los perfiles de suelo y el modelo de análisis de ISE que se emplea en cada norma.

Después de realizar la comparación, se realizó el planteamiento de la propuesta preliminar para suelos peruanos. Para ello, se realizó una breve recopilación de las comparaciones hechas con cada norma. Luego, en base a las semejanzas y afinidad con los modelos estudiados, se recomendó el método de análisis de ISE más óptimo para cada perfil de suelo establecido en la NTE E.030 Diseño Sismorresistente.

Capítulo 2. Revisión de la literatura

En este capítulo, se comenta sobre el estado del arte necesario para elaborar la propuesta preliminar.

2. 1. Interacción suelo - estructura

La interacción suelo - estructura es de particular interés cuando se trata de proyectar estructuras. En especial, el movimiento de la superficie del terreno generado durante un sismo es muy útil para determinar la resistencia con la cual debemos dotar a las cimentaciones de una edificación. Hoy en día, es difícil predecir con exactitud el movimiento sísmico de los suelos y, únicamente, se pueden calcular o predecir algunas características típicas de dicho movimiento. Sin embargo, existe un gran número de investigaciones relacionadas a la caracterización del movimiento sísmico de la superficie del terreno. Estos parten de datos generales de los movimientos sísmicos; tales como, distancia al epicentro, profundidad del foco, magnitud e intensidad local, para predecir el movimiento de estratos de suelo libre; es decir, sin la presencia de estructuras (Soriano, 1989). Esto último es de interés particular, ya que los modelos no predicen el movimiento del suelo sobre el cual están cimentadas las estructuras.

En base a lo anteriormente expuesto, es claro que un modelo que caracterice la interacción suelo - estructura (ISE) permite obtener respuestas más acertadas del movimiento del suelo adyacente a las cimentaciones. El presente trabajo de investigación recopila información de algunos de estos modelos, varios de los cuales son empleados en normas internacionales. Entre estos modelos se pueden encontrar los siguientes:

- Modelo dinámico D. D. Barkan - O. A. Savinov
- Modelo dinámico Winkler
- Modelo dinámico V. A. Ilichev
- Modelo dinámico A. E. Sargsian

Los modelos de ISE toman en cuenta las propiedades de los estratos de suelo y las características de la cimentación de las estructuras. Esto es de vital importancia en la caracterización; puesto que, la geometría de las cimentaciones influye ampliamente en la respuesta del suelo y en cómo se mueve en casos sísmicos. Por eso, el caso más simple de análisis de ISE es el que ocurre en zonas pequeñas de contacto, los cuales pueden considerarse puntuales respecto a las longitudes de las ondas sísmicas (Soriano, 1989).

En el Perú, la NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018) no considera la interacción suelo -estructura. Los modelos empleados por esta norma son una simplificación del comportamiento real del suelo; debido a ello, se puede llegar a omitir sollicitaciones importantes

que un modelo de ISE puede predecir eficientemente. Además, los proyectos de construcción civil suelen emplear en su mayoría cimentaciones superficiales en el país.

Los modelos que describe este documento predicen eficientemente la interacción con este tipo de cimentaciones ya que estas transmiten, en su totalidad, las cargas horizontales, verticales y momentos al terreno a través de su base en contacto.

2. 2. Interacción suelo - estructura

El presente trabajo de investigación está enfocado, principalmente, en brindar los métodos de análisis suelo - estructura para edificaciones que cuenten con cimentaciones superficiales.

Las cimentaciones superficiales son de amplio uso en el Perú debido a su menor costo y mayor facilidad de ejecución. Según la NTE E.050 Suelos y Cimentaciones (2018), este tipo de cimentaciones se caracterizan por tener una relación profundidad/ancho menor o igual a 5. Asimismo, estas se pueden clasificar en 5 tipos de cimentaciones superficiales en el comportamiento estructural de la cimentación. Entre las cimentaciones superficiales, de uso general en el Perú, se pueden catalogar los siguientes tipos: zapatas aisladas, zapatas combinadas, zapatas conectadas, cimientos corridos y losas de cimentación. A continuación, se presentan las principales características de cada uno de estos tipos.

2. 2. 1. Zapatas aisladas

Esta es una cimentación puntual que recibe solo un sistema de carga, ya sea de columnas o de placas. Las zapatas aisladas se emplean en terreno firme y competente, transmitiendo esfuerzos moderados que provocan asentamientos en el terreno (Yepes, 2020). Esta es una de las cimentaciones más simples y de menor costo; por lo que, su uso está altamente extendido en Perú.

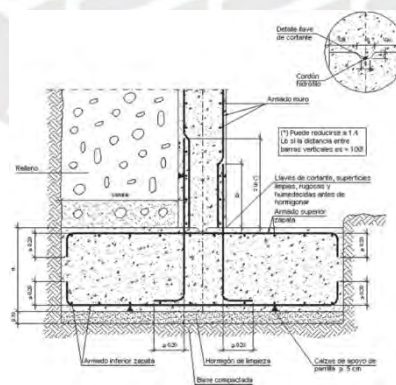


Figura 2.1. Zapata aislada (Yepes, 2020)

2. 2. 2. Zapatas combinadas

Este tipo de cimentación se caracteriza porque sobre ella se apoyan de dos a más elementos verticales, entre columnas y placas. Este tipo de zapatas, generalmente, se conciben

cuando las dimensiones de dos o más cimentaciones aisladas se superponen o están muy próximas, dificultando los procesos de excavación; o, cuando se busca uniformizar los asentamientos (Yepes, 2020). Estructuralmente, el diseño de este tipo de cimentaciones puede requerir de refuerzos en la parte superior de la zapata; debido a que las cargas que le transmiten los elementos verticales pueden generar esfuerzos de tracción en la zona central de la zapata.

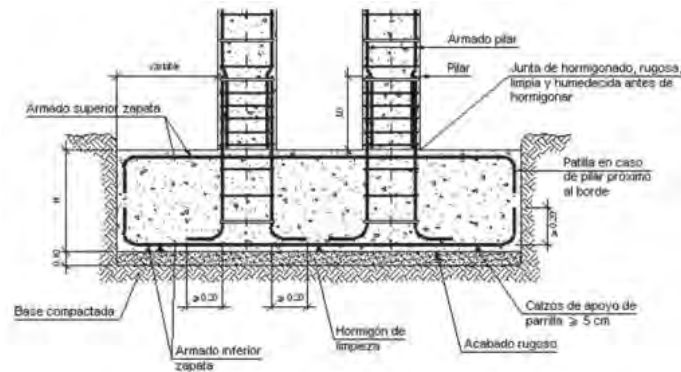


Figura 2.2. Zapata combinada (Yepes, 2020)

2. 2. 3. Zapatas conectadas

Las zapatas conectadas se caracterizan por estar unidas mediante una viga de cimentación a otra zapata contigua o, a un peso muerto. Este tipo de cimentaciones generalmente se implementan en proyectos rodeados por edificaciones vecinas; en las cuales, se puede producir falla por volteo de las zapatas ubicadas en los límites de propiedad.

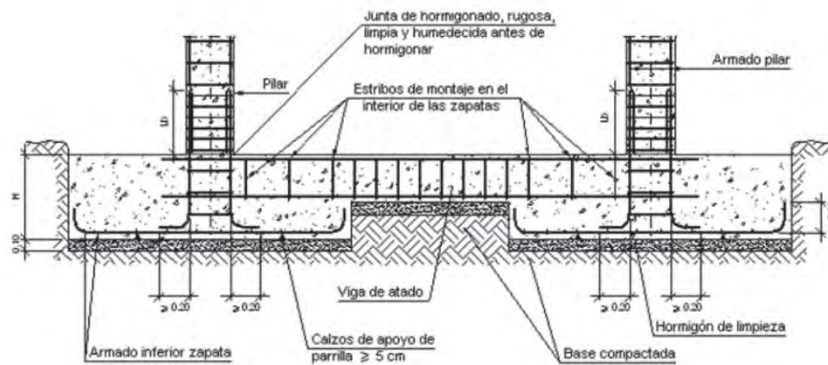


Figura 2.3. Zapata conectada (Yepes, 2020)

2. 2. 4. Cimientos corridos

Este tipo de cimentaciones se emplean para apoyar elementos lineales continuos sobre el terreno, tales como, muros de albañilería, muros de contención, entre otros. Se caracterizan por poseer una gran longitud comparada a sus otras dimensiones; asimismo, gracias a su forma, produce asentamientos y esfuerzos uniformes en el terreno.

2. 2. 5. Losas de cimentación

Este tipo de cimentación es el menos usado en el Perú debido a su alto costo. Las losas de cimentación se caracterizan por poseer grandes dimensiones en planta, sobre la cual se apoyan todos o la mayoría de elementos verticales de un proyecto. Estas se emplean generalmente cuando se tiene una gran área de cimentaciones en comparación al área del terreno. Asimismo, se emplean cuando la capacidad portante del terreno es insuficiente o cuando existen problemas de asentamientos diferenciales.

2. 3. Modelo de interacción de suelo - estructura

Se presentan los modelos propuestos para interacción suelo - estructura.

2. 3. 1. Modelo dinámico D.D. Barkan - O.A. Savinov

Este modelo es del tipo teórico - experimental y se encuentra fundamentado en el modo en que se relacionan o interactúan las cimentaciones con la base de la fundación (suelo).

De acuerdo a lo planteado por el científico D.D Barkan, se plantea el uso de coeficientes de rigidez que relacionan la compresión y desplazamiento elástico actuantes sobre una inercia y área (Meza, 2014). Se calculan estos coeficientes con las siguientes expresiones relacionada a 5 grados de libertad obviando el giro alrededor del eje Z:

$$K_z = C_z * A \quad (2.1)$$

$$K_x = C_x * A \quad (2.2)$$

$$K_\phi = C_\phi * I \quad (2.3)$$

Donde:

- C_z, C_ϕ : Coeficientes de compresión uniforme y no uniforme
- C_x : Coeficiente de desplazamiento elástico uniforme
- A : Área de base de cimentación
- I : Momento de Inercia de la base de la cimentación

Asimismo, para el cálculo de los coeficientes C_z, C_ϕ, C_x , se propusieron distintas formulaciones que tomaban en cuenta las características elásticas del suelo, las propiedades inerciales del suelo y las relaciones de la base de la cimentación (Meza, 2014). A continuación, se muestran las expresiones finales:

$$C_z = C_o * \left(1 + \frac{2 * (a + b)}{\Delta A}\right) * \sqrt{\frac{\rho}{\rho_o}} \quad (2.4)$$

$$C_x = D_o * \left(1 + \frac{2 * (a + b)}{\Delta A}\right) * \sqrt{\frac{\rho}{\rho_o}} \quad (2.5)$$

$$C_{\emptyset} = C_o * \left(1 + \frac{2 * (a + 3b)}{\Delta A}\right) * \sqrt{\frac{\rho}{\rho_o}} \quad (2.6)$$

Donde:

- C_o, D_o : Coeficientes experimentales
- a, b : Dimensiones de cimentación
- Δ : Coeficiente asumido ($1m^{-1}$)
- p : Presión estática que transmite a la cimentación y la base (kg/cm^2)
- ρ_o : Presión estática inicial ($0.2 kg/cm^2$)

Se recomienda usar las siguientes expresiones de C_o y D_o para los cálculos prácticos y rápidos.

$$C_o = 1.7 * \frac{E_o}{1 - u^2} * 10^{-3} \left(\frac{kg}{cm^3}\right) \quad (2.7)$$

$$D_o = 1.7 * \frac{E_o}{(1 + u) * (1 - 0,5u)} * 10^{-3} \left(\frac{kg}{cm^3}\right) \quad (2.8)$$

Donde:

- E_o : Módulo de elasticidad
- u : Módulo de Poisson

De manera alternativa, el valor de C_o se puede calcular a través de la Tabla 2.1 que funciona para valores de $\rho_o = 0.2 kg/cm^2$.

Tabla 2.1. Valores de Co (Villarreal Castro, 2017)

Perfil	Tipo de la base de fundación	Tipo de Suelo	Co (kg/cm ³)
S1	Suelos muy rígidos	Arcilla o arena arcillosa dura L ($I < 0$)	3.0
		Arenas compactas L ($I < 0$)	2.2
		Cascajo, arena densa, canto rodado, grava	2.6
S2	Suelos intermedios	Arcilla y arena arcillosa plástica ($0,25 < I \leq 0,5$)	2.0
		Arena plástica ($0 < I \leq 0,5$)	1.6
		Arena polvorosa medio densa ($e \leq 0,80$)	1.4
		Arenas de grano grueso, mediano y fino,	1.8
S3	Suelos flexibles o con estratos de gran espesor	Arcilla y arena arcillosa de baja plasticidad ($0,5 < I \leq 0,75$)	0.8
		Arena plástica ($0,5 < I \leq 1$)	1.0
		Arenas polvorosa, saturada y porosa ($e > 0,80$)	1.2
S4	Condiciones extrañas (suelos orgánicos o rellenos no controlados)	Arcilla y arena arcillosa muy blanda L ($I > 0,75$)	0.6
		Arena movediza L ($I > 1$)	0.6

La Tabla 2.1 es el resultado de ensayos experimentales propuesto por el ingeniero Villarreal Castro (2017) para suelos peruanos. Asimismo, la clasificación de suelos brindada en dicha tabla es similar a la clasificación de suelos de la NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018) (artículo 2.3.1), por lo que los datos brindados serían aplicables para suelos peruanos. Sin embargo, se recomienda que se realicen ensayos de clasificación de suelo, como el ensayo SPT.

2.3.2. Modelo dinámico Winkler

Según Luis Mejía (2017), el modelo dinámico Winkler es un modelo de idealización del suelo que comprende las siguientes consideraciones:

- Suelo compuesto por resortes repartidos en toda su superficie
- Los resortes tienen poco espaciamiento entre ellos y son linealmente elásticos.
- La deformación está relacionada con el lugar de aplicación de carga, esto debido a la asunción de resortes independientes, por lo que la cohesión entre las partículas sería despreciada y esto no representa la realidad.

La relación para el último punto viene dada por:

$$P = d * K \quad (2.9)$$

Donde:

- P : Presión aplicada
- d : Deformación
- k : Coeficiente de reacción del suelo

El modelo de Winkler ha ganado importancia debido a la simplicidad que posee para representar un problema de alta complejidad. La relación deformación - presión es tan compleja que un gran número de investigadores ha intentado representarla mediante gráficos (Mejía, 2017). Esto origina variedad de resultados y modelos diferentes entre sí, pues dependen de las condiciones usadas tales como:

- Condiciones de carga
- Tipo de material de cimentación
- Forma de la cimentación
- Dimensiones de la cimentación
- Rigidez de la cimentación
- Dirección de las cargas
- Tipo de suelo

El coeficiente de reacción del suelo o coeficiente de balasto se puede hallar tanto experimentalmente, mediante un ensayo de carga sobre placas metálicas o teóricamente, mediante fórmulas planteadas por investigadores como Vesic o Terzaghi. Esto en base a los estudios que realizaron y los ensayos que aplicaron, con el objetivo de reducir la incertidumbre al momento de hallar este parámetro tan importante en el análisis de la respuesta suelo - estructura.

- **Objeciones y mejoras de este método**

Se menciona que este método puede ser usado para el cálculo de cimentaciones rígidas y flexibles. Si bien se decide optar por métodos simplificados para cimentaciones rígidas, se sugiere considerar el método de balasto para el cálculo de elementos flexibles, en los cuales se tiene una distribución de tensiones irregular (Jines, 2017).

Existen varios comentarios resaltantes sobre este método, los cuales son:

- El módulo de balasto no es una función exclusiva del terreno, ya que depende de las características geométricas de la cimentación y la estructura que sostiene.
- La precisión depende de la rigidez relativa del conjunto estructura-fundación respecto a la del suelo.

- Se supone comportamiento independiente de las cargas existentes en sus alrededores.

A continuación, se muestran las formas de determinar el coeficiente de balasto.

Placa de carga y Terzaghi

Consiste en un ensayo donde se coloca una placa que puede ser cuadrada o circular, a la cual se le aplica cargas, obteniendo así un coeficiente de balasto acompañado de un subíndice que dependerá de las dimensiones de la placa.

El módulo de balasto se obtiene con la siguiente fórmula:

$$k_s \text{ rectangular} = \frac{2}{3} * k_s \text{ cuadrado} * \left(1 + \frac{b}{2L}\right) \quad (2.10)$$

Donde:

- b : Menor dimensión del rectángulo
- L : Mayor dimensión del rectángulo
- $K_s \text{ cuadrado}$: k_s obtenido de un ensayo de placa de carga con una placa cuadrada

También se tiene ecuaciones según el tipo de suelo que se tenga:

$$k_s \text{ cuadrado cohesivo} = k_{s30} * \frac{0.3}{b} \quad (2.11)$$

$$k_s \text{ cuadrado granular} = k_{s30} * \left(\frac{b + 0.30}{2b}\right) * 2 \quad (2.12)$$

Donde:

- b : Lado del cuadrado
- k_{30} : k_s obtenido de un ensayo de placa de carga con una placa cuadrada de 30 cm de lado

Como referencia Terzaghi planteó, en base a diversos ensayos experimentales, los siguientes valores de k_{30} . Estos dependen del tipo de suelo, su compacidad y la resistencia a compresión simple de estos:

Tabla 2.2. Valores de k_{30} propuestos por Terzaghi

Suelo	k_{30} (kg/cm ³)
Arena seca o húmeda	
Suelta	1.30
Media	4.00
Compacta	16.00
Arena sumergida	
Suelta	0.80
Media	2.50
Compacta	10.00
Arcilla	
$qu = 1 - 2kg/cm^2$	2.50
$qu = 2 - 4kg/cm^2$	5.00
$qu > 4kg/cm^2$	10.00

Cabe decir que, los valores en la Tabla 2.2 son valores medios para el rango considerado y se podría ser más preciso si se interpolara los valores dentro de los rangos específicos. Además de Terzaghi, otros autores han planteado rangos según el tipo de suelo analizado y estos se muestran a continuación:

Tabla 2.3. Valores de k_{30} propuestos por varios autores (Gesto de Dios, 2006)

Suelo	k_{30} (kg/cm ³)
Arena fina de playa	1-1.5
Arena floja, seca o húmeda	1-3
Arena media, seca o húmeda	3-9
Arena compacta, seca o húmeda	9-20
Gravilla arenosa floja	4-8
Gravilla arenosa compacta	9-25
Grava arenosa floja	7-12
Grava arenosa compacta	12-30
Margas arcillosas	20-40
Rocas blandas o algo alteradas	30-500
Rocas sanas	800-30 000

En la Tabla 2.3, solo se indican valores propuestos por algunos autores (Jines, 2017) y se sugiere usarlos como referencia únicamente, ya que no se puede conectar directamente con los tipos de suelo que tiene el Perú. Además del ensayo de placa de carga, se ha demostrado que el coeficiente de balasto se puede determinar mediante el uso de parámetros elásticos propios del suelo estudiado como se muestra a continuación.

Vesic

$$k_s = \frac{E_s}{(B * (1 - \nu_s^2))} \quad (2.13)$$

Donde:

- B : Ancho de la cimentación
- E_s : Módulo de elasticidad del suelo
- ν_s : Módulo de Poisson del suelo

Klepikoy

$$k_s = \frac{E_s}{(w * A^{0.5} * (1 - \nu_s^2))} \quad (2.14)$$

Donde:

- A : Área de la base de la cimentación
- w : Coeficiente de forma de la cimentación que depende de B y L (dimensiones de la cimentación)

2.3.3. Modelo dinámico V.A. Ilichev

Este modelo dinámico fue propuesto teniendo en cuenta un espacio elástico donde existan problemas ondulatorios de interacción suelo - estructura. El esquema propuesto para este modelo es el siguiente:

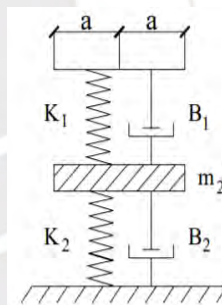


Figura 2.4. Modelo Dinámico Ilichev (Villareal, 2020)

Con respecto al modelo presentado anteriormente, el elemento superior modela a una placa sin peso con un resorte y amortiguador de coeficientes K_1 y B_1 respectivamente, que simulan el efecto generado por las ondas longitudinales. Asimismo, en la parte inferior del modelo, se representa con el efecto del comportamiento dinámico de la placa cuyos coeficientes m_2 , B_2 y K_2 son función del coeficiente de Poisson (μ) principalmente. Cabe mencionar que, en dicho modelo, los efectos de las ondas de Rayleigh y transversales fueron diferenciados para que el comportamiento sea adecuado (Villareal, 2020).

Es necesario mencionar que el modelo planteado cuenta con 1.5 grados de libertad. El primer grado de libertad está ubicado en la parte inferior, mientras que el medio grado de

libertad está ubicado en la parte superior del mismo modelo. Por tal motivo, se tiene que la variación del coeficiente de elasticidad en la dirección Z viene dada por la siguiente expresión:

$$k_s = \frac{E_s}{(w * A^{0.5} * (1 - \nu_s^2))} \quad (2.15)$$

$$E_z = E_o * (tg\varphi * \frac{z}{\alpha} + 1) \quad (2.16)$$

Donde:

- E_o : Módulo de elasticidad (ton/m²) del suelo a nivel 0
- φ : Ángulo de fricción interna del suelo
- E_z : Módulo de deformación den la coordenada z
- A : Área de la cimentación
- α : 1 m
- ν_s : Velocidad de ondas longitudinales (m/s)

Asimismo, se debe calcular el valor del coeficiente a , ya que con este se define el rango donde las propiedades de deformación varían ($3a$; $5a$). Por tal motivo, se definen las siguientes ecuaciones.

$$a = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (2.17)$$

$$Y = Y_o + Y_1 * tg\varphi * \sqrt{\frac{A}{\alpha}} \quad (2.18)$$

Donde:

- Y_o, Y_1 : Coeficientes determinados por tablas en función del valor (u)

Finalmente, para calcular el coeficiente Y se debe tener en cuenta el tipo de ondas existentes:

- **Vibraciones rotacionales**

$$K_\varphi = C_2^2 * \rho * K * a^3 \quad (2.19)$$

$$B_{\varphi} = (C_2) * \rho * b * a^4 \quad (2.20)$$

$$M_{\varphi} = \rho * a^5 * m \quad (2.21)$$

- **Vibraciones horizontales**

$$K_{X(z)} = C_2^2 * \rho * K * a \quad (2.22)$$

$$B_{X(z)} = C_2 * \rho * b * a^2 \quad (2.23)$$

$$M_{X(z)} = \rho * a^3 * m \quad (2.24)$$

Siendo el valor de C_2 la velocidad de propagación de onda transversal y ρ la densidad del suelo. Además, para calcular el valor del coeficiente K es:

$$K = \frac{K_1 * K_2}{K_1 + K_2} \quad (2.25)$$

2. 3. 4. Modelo Dinámico A.E. Sargsian

Este modelo dinámico interacción suelo-estructura fue creado con fines estudiantiles y fue propuesto por los investigadores A.E. Sargsian y A.A. Najapetian, los cuales definieron parámetros cuasiestáticos de rigidez que se asignan a la base de fundación de la estructura (K_x , K_{ϕ} , K_z).

Estas están definidas de la siguiente manera:

$$K_x = \frac{28.8(1 - \mu^2) * \rho * C_2^2 * \sqrt{A}}{\pi * (7 - 8\mu)} \quad (2.26)$$

$$K_{\phi} = \frac{8.52 * \rho * C_2^2 * I}{\sqrt{\pi} * (1 - \mu) * \sqrt{A}} \quad (2.27)$$

$$K_z = \frac{\rho * C_1^2 * \sqrt{A}}{\Phi * (1 - \mu^2)} \quad (2.28)$$

Donde:

- ρ : Densidad del suelo de fundación
- A : Área de la base de la cimentación
- I : Momento de inercia del área de la base de la cimentación respecto al eje horizontal, que pasa por el centro de gravedad perpendicular al plano de vibración
- Φ : 0.833
- μ : Coeficiente de Poisson del suelo
- C_1^2 : Velocidad de propagación de las ondas longitudinales en el suelo de fundación
- C_2^2 : Velocidad de propagación de las ondas transversales.

Además, para el cálculo de C_1^2 y C_2^2 (velocidad de propagación de ondas longitudinales y transversales), se utiliza la base teórica de semi espacio elástico, con las siguiente fórmulas:

$$C_1^2 = \frac{(1 - \mu) \cdot E}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu) \cdot \rho} \quad (2.29)$$

$$C_2^2 = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu) \cdot \rho} \quad (2.30)$$

Donde:

- E : Módulo de elasticidad de la base de fundación

Este modelo no contempla limitaciones para el tipo de suelo y tiene una aplicación académica. De hecho, de la investigación titulada “Interacción suelo-estructura en base a modelos dinámicos - Norma Rusa SNIP 2.02.05-87 (1987) y A.E. Sargsian” realizada por Marcos Gutierrez (2019), concluye que los resultados de periodos, derivas, fuerzas axiales y momentos son menores en comparación con la norma rusa. Por dicha razón, el método Sargsian proporciona resultados menos conservadores, ya que las secciones de diseño de los elementos de cimentación son menores que si se diseñan empleando la norma rusa mencionada en el título.

Capítulo 3. Desarrollo de la investigación

En este capítulo, se realizan explicaciones sobre las diversas normas que se usaron como base para realizar la propuesta preliminar. Se establece la propuesta para cada tipo de suelo que establece la NTE E.030 Diseño Sismorresistente.

3. 1. Análisis y Comparación entre la Normas Técnicas

En esta sección, se presentan las normas peruana, chilena, mexicana y rusa. Estas se compararon entre sí para llegar a una serie de recomendaciones.

3. 1. 1. Normas peruanas

Tal como se mencionó anteriormente, las normas peruanas involucradas en el análisis y diseño de cimentaciones son la NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018) y la NTE E.050 Suelos y Cimentaciones (2018).

La primera de ellas dicta los criterios necesarios para diseñar edificaciones de acuerdo a las condiciones sísmicas de Perú. Para ello, se basa en parámetros sísmicos que dependen de la zonificación, condiciones del suelo, factores de uso, amplificación y reducción de fuerzas sísmicas. Posteriormente, se realiza un análisis dinámico espectral, estático o tiempo-historia de la edificación; para que, de esta forma, se obtengan las cargas que afectan a las cimentaciones. Asimismo, el Capítulo VII de esta norma dicta reglamentos relacionados a factores de reducción de las cargas sísmicas, capacidad portante del suelo de cimentación, posibilidad de licuefacción, momento de volteo y consideraciones con suelos flexibles.

Por otro lado, la NTE E.050 Suelos y Cimentaciones (2018) está más enfocada a los requerimientos mínimos de los estudios de mecánica de suelos (EMS) y el comportamiento de las cimentaciones. Para el dimensionamiento y diseño de las cimentaciones, esta norma establece criterios para el análisis de las condiciones de cimentación, los cuales están relacionados a las propiedades de los estratos de suelo. Así mismo, relacionado al enfoque de esta investigación, el Capítulo IV de esta norma dispone pautas y condiciones para el uso y diseño de cimentaciones superficiales, en las que se incluye el análisis de la transmisión de esfuerzos en el suelo.

A continuación, se revisan algunos conceptos incluidos en estas normas que nos permitirán realizar un análisis comparativo con las demás.

- **Zonificación**

La NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018) divide el territorio peruano en cuatro zonas sísmicas, las cuales se muestran a continuación:



Figura 3.1. Zonas sísmicas del Perú (NTE E.030 Diseño Sismorresistente, 2018)

Tal como presenta la NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018), esta zonificación se basa en la actividad sísmica observada, los movimientos sísmicos y la atenuación de estos con la distancia al epicentro, así como en la información tectónica. A cada una de las zonas sísmicas propuestas le corresponde un factor Z , el cual se interpreta como la máxima aceleración horizontal en un suelo rígido con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años.

- **Tipos de suelo**

El Artículo 12 de la norma NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018), clasifica los suelos en cinco perfiles como se ve en la A este tipo corresponden los suelos excepcionalmente flexibles y los sitios donde las condiciones geológicas y/o topográficas son particularmente desfavorables, en los cuales se requiere efectuar un EMS que determine que el suelo pertenece a este perfil.

Tabla 3.1, en función de la velocidad promedio de propagación de las ondas de corte. O también, los clasifica en función del promedio ponderado de \overline{N}_{60} obtenido de ensayos SPT para el caso de suelos granulares, o en función del promedio ponderado de la resistencia al corte en condición no drenada para suelos cohesivos. Los perfiles y criterios de clasificación son los siguientes:

Perfil Tipo S0: Roca Dura

Este tipo de suelo se caracteriza por tener una velocidad de propagación de las ondas de corte superior a 1500 m/s.

Perfil Tipo S1: Roca o suelos muy rígidos

Son rocas con diferentes grados de fracturación y suelos muy rígidos que presentan velocidades de propagación de onda de corte entre 500 a 1500 m/s. También, se incluyen los siguientes casos:

- Roca fracturada con una resistencia a la compresión no confinada q_u mayor o igual que 5 kg/cm²

- Arena muy densa o grava arenosa densa con \overline{N}_{60} mayor que 50
- Arcilla muy compacta con una resistencia al corte en condición no drenada S_u mayor que 1 kg/cm²

Perfil Tipo S2: Suelos Intermedios

Suelos medianamente rígidos, con velocidades de propagación de onda de corte entre 180 m/s y 500 m/s. También, se incluyen los siguientes casos:

- Arena densa, gruesa a media, o grava arenosa medianamente densa, con \overline{N}_{60} entre 15 y 50
- Suelo cohesivo compacto, con S_u entre 0.5 kg/cm² y 1 kg/cm²

Perfil Tipo S3: Suelos blandos

Son suelos flexibles con velocidades de propagación de onda de corte menor o igual a 180 m/s. También, se incluyen los siguientes casos:

- Arena media a fina o grava arenosa con \overline{N}_{60} entre 15 y 50
- Suelo cohesivo blando con S_u entre 0.25 kg/cm² y 0.5 kg/cm²
- Cualquier perfil que no corresponda al tipo S4 y que tenga más de 3 m de suelo con las siguientes características: índice de plasticidad PI mayor que 20, contenido de humedad ω mayor que 40% y S_u menor que 2.5 kg/cm².

Perfil Tipo S4: Condiciones Excepcionales

A este tipo corresponden los suelos excepcionalmente flexibles y los sitios donde las condiciones geológicas y/o topográficas son particularmente desfavorables, en los cuales se requiere efectuar un EMS que determine que el suelo pertenece a este perfil.

Tabla 3.1. Clasificación de los perfiles de suelo (NTE E.030 Diseño Sismorresistente, 2018)

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

• Interacción suelo-estructura

En base a lo anteriormente expuesto y examinando el contenido de ambas normas, se puede notar que la normativa en el Perú no incluye modelos de interacción suelo - estructura. Los criterios y pautas que establece para el análisis, dimensionamiento y diseño de cimentaciones son conceptos aplicados individualmente tanto al suelo como a las cimentaciones. En otras palabras, no se incluye un análisis conjunto de ambos elementos.

3. 1. 2. Norma Chilena 433.OF1996-Diseño Sísmico de edificios

Al igual que el caso peruano, las normas involucradas para realizar el diseño de cimentaciones son principalmente la norma 433 Diseño sísmico de edificios (2012) y la norma 1508 Estudio de mecánica de suelos (2012).

En la primera de ellas, se dicta el procedimiento y consideraciones para el diseño sísmico de edificaciones como el método de diseño estático o dinámico, requisitos mínimos de juntas, etc.

Por otra parte, la norma 1508 Estudio de mecánica de suelos (2012) se basa en los procedimientos de los estudios de mecánica de suelos y el correcto procedimiento para realizarlo. Asimismo, se menciona un formato de informe de mecánica de suelos lo cual es de utilidad para realizar el diseño de zapatas o “fundaciones superficiales”.

A continuación, se revisan algunos conceptos incluidos en la Norma Chilena 433 de Diseño sísmico (2012) que permitieron realizar un análisis comparativo con las demás.

- **Zonificación**

La zonificación sísmica es una herramienta útil que nos indica las zonas más propensas o susceptibles a sufrir una mayor sollicitación sísmica. De acuerdo al artículo 4.1 de la norma 433 Diseño sísmico de edificios (2012), se definen 3 zonas sísmicas a lo largo de todo el territorio chileno. A continuación, se muestra dicha zonificación para cada una de las Regiones.



Figura 3.2. Zonificación Sísmica de las regiones I-II-III-XV (Norma 433 Diseño sísmico de edificios, 2012)



Figura 3.3. Zonificación Sísmica de las regiones IV-V-VI-VII-VIII-IX-X-XIV-Reg. Metropolitana (Norma 433 Diseño sísmico de edificios, 2012)

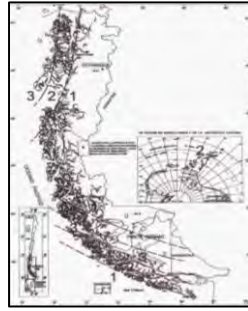


Figura 3.4. Zonificación Sísmica de las regiones XI-XII (Norma 433 Diseño sísmico de edificios, 2012)

- **Tipos de suelos**

De acuerdo al artículo 4.2.3.1 de la Norma Chilena de Diseño Sísmico (2012), se definen 6 tipos de suelo con respecto a la clasificación sísmica del terreno. Para esta clasificación, se tiene en cuenta propiedades físicas y mecánicas del suelo. Se muestra un resumen de la clasificación extraída de la Norma Chilena sección de Anexos (2012).

Tabla 3.2. Clasificación sísmica de los suelos

		V_{S30} (m/s)	RQD	qu (MPa)	$N1$ (golpes/pie)	Su (MPa)
A	Roca, suelo cementado	≥ 900	$\geq 50\%$	≥ 10 ($\epsilon_{qu} \leq 2\%$)		
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500		≥ 0.40 ($\epsilon_{qu} \leq 2\%$)	≥ 50	
C	Suelo denso o firme	≥ 350		≥ 0.30 ($\epsilon_{qu} \leq 2\%$)	≥ 40	
D	Suelo medianamente denso o firme	≥ 180			≥ 30	≥ 0.05
E	Suelo de compactidad o consistencia mediana	< 180			≥ 20	< 0.05
F	Suelos Especiales	---	---	---	---	---

Donde:

- V_{S30} : Velocidad de onda de corte equivalente de los 30 metros superiores de terreno
- RQD : Rock Quality Designation
- qu : Resistencia a la compresión simple del suelo
- $N1$: Índice de penetración estándar
- Su : Resistencia al corte no drenado del suelo
- ϵ_{qu} : Deformación unitaria del suelo desarrollada cuando se alcanza la resistencia máxima en el ensayo de compresión simple

- **Interacción suelo estructura**

Con respecto a la interacción entre el suelo de fundación y la estructura, la norma 433 Diseño sísmico de edificios (2012) no incluye un capítulo relacionado a este fenómeno. Por tal motivo, es recomendable realizar una investigación para evaluar dicho fenómeno e incluirlo en el método de diseño que se maneja, tal como hacen otros países como México o Rusia.

3. 1. 3. Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (2017)

Para el caso de México, se tiene una sola norma que detalla las consideraciones que se debe hacer para considerar el efecto suelo-estructura: son las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (2017). En esta, se plantean los procedimientos a seguir para el diseño por sismo de las diferentes edificaciones que existen. Este diseño depende de la zonificación geotécnica y sísmica planteada por la norma y del tipo de edificación.

Aparte, el capítulo 8 de la norma indica los pasos a seguir para considerar el efecto de ISE en el diseño sísmico, el cálculo de los nuevos parámetros y la variación en la respuesta de la estructura debido a las cargas de sismo. En el primer capítulo de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño Sísmico (2017), se puede encontrar lo siguiente:

- **Zonificación**

El país de México se divide en 4 zonas según el nivel de riesgo sísmico que poseen. Estas se presentan a continuación y son descritas por la página oficial del gobierno de México como:

a) Zona A

Zonas que no tienen registros de sismos importantes en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a 0.1g.

b) Zona B y Zona C

Zonas que no registran sismos tan frecuentemente o son zonas con aceleraciones que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo.

c) Zona D

Zonas que han registrado sismos históricos y con una ocurrencia de sismos frecuentes con aceleraciones del suelo menores a 0.7g.

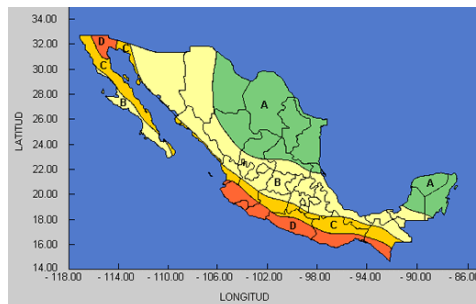


Figura 3.5. Regiones sísmicas de México (Normas Técnicas Complementarias de Diseño Sísmico, 2017)

- **Tipos de suelo**

Se tienen tres zonas consideradas en la Zonificación Geotécnica de la Ciudad de México, señalada por las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones (2017). De acuerdo a esto, la Ciudad de México se divide en tres zonas y Luis Mejía (2017) las describe de la siguiente manera:

a) Zona I (o de Lomas)

Esta zona está conformada por rocas y/o suelos firmes depositados fuera del ambiente lacustre. Además de ello, se pueden encontrar depósitos de arena suelta o suelos cohesivos blandos.

b) Zona II (o de Transición)

En esta zona, se encuentran depósitos profundos a 20 m de profundidad y estratos arenosos y limo-arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre. El espesor de estos varía de decenas a centímetros y pocos metros.

c) Zona III (o del Lago)

Esta zona está conformada por depósitos de arcilla altamente compresible, alternados por capas de arena con limo o arcilla, las cuales poseen una consistencia firme y espesores variables. Esta zona suele estar cubierta por suelos aluviales y rellenos artificiales. Adicionalmente, se puede dividir en 4 sub-zonas (IIIa, IIIb, IIIc, IIId).

Con respecto al tipo de suelo, el SASID se encarga de establecer los parámetros sísmicos del sitio para el cálculo de los espectros de aceleraciones, así como coeficientes sísmicos de reducción.

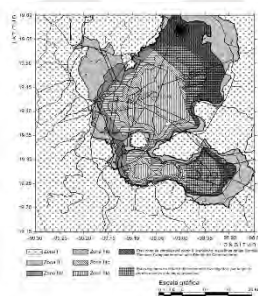


Figura 3.6. Zonificación del DF para fines de diseño por sismo (Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones, 2017)

- **Interacción suelo-estructura**

Según las Normas Técnicas Complementarias para Diseño Sísmico (2017), publicada por la Gaceta oficial de la Ciudad de México, los espectros iniciales de sismo desprecian efectos

importantes que, dependiendo del tipo de suelo y tipo de zona, podrían afectar la respuesta estructural de la edificación en cuestión. Algunos de estos efectos son los siguientes:

a) Interacción cinética

Según A. Soriano (1989), la interacción cinemática participa y permite que las ecuaciones de interacción inercial brinden una respuesta completa y real del sistema. A pesar de ello, existen casos donde su efecto es nulo y es despreciado. Para ello, se deben cumplir las siguientes condiciones:

Condición 1:

Se deben cumplir las siguientes condiciones:

$$\frac{T_s}{\tau_v} < 12 \tag{3.1}$$

$$\frac{D}{r} < 0.5 \tag{3.2}$$

Donde:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \tag{3.3}$$

$$V_s = \frac{4H_s}{T_s} \tag{3.4}$$

- *A*: Área de la cimentación
- *D*: Profundidad de desplante
- τ_v : Tiempo de tránsito de las ondas sísmicas a través de la profundidad de desplante
- *H_s*: Profundidad de la segunda capa dura
- *V_s*: Velocidad efectiva de ondas cortantes
- *T_s*: Período dominante de vibrar más largo del terreno

Condición 2

Es necesario mencionar que debe cumplirse que la estructura posea niveles subterráneos sin pilas ni pilotes y, además, se encuentre en las Zonas II y III.

b) Interacción Inercial

La interacción inercial es aquella que puede incrementar o reducir las fuerzas sísmicas de diseño con respecto a los valores calculados usando suelo rígido, todo esto dependiendo del periodo y amortiguamiento efectivo del sistema, así como de la forma del espectro. Al igual que en el anterior caso, existen ocasiones en las que se puede desprestigiar este efecto y es cuando se cumple la siguiente condición:

Condición 1:

Se deben cumplir las siguientes condiciones:

$$\frac{T_e \cdot H_s}{T_s \cdot H_e} > 2.5 \quad (3.5)$$

Donde:

- T_e : Periodo fundamental de la estructura con base rígida
- H_e : Altura efectiva que se tomará como 0.7 de la altura total, excepto para estructuras de un solo nivel, en que será igual a la altura total.
- T_s : Periodo dominante del sitio; se toma del SASID

Condición 2:

Igual que en el anterior caso, también es necesario que la estructura se encuentre en las Zonas II Y III.

- **Cargas modificadas de la interacción suelo-estructura**

En este apartado se muestran las ecuaciones planteadas por las NTC de Diseño Sísmico (2017), las cuales consideran los dos análisis de sismo que se plantea: estático y dinámico modal. En ambos casos, la modificación depende del peso de la estructura, periodo y amortiguamiento, y parámetros sísmicos con y sin interacción de la estructura.

Los siguientes casos proponen una forma de hallar la cortante basal modificada en la dirección de análisis. Estos son:

a) Caso estático

La cortante basal modificada (\tilde{V}_o) se corrige por la siguiente expresión:

$$\tilde{V}_o = a' * W_o - (a' - \tilde{a}') * W_e \quad (3.6)$$

Donde:

- W_o : Peso total de la estructura, incluyendo cargas muertas y vivas
- W_e : Peso efectivo de la estructura, igual a $0.7W_o$, excepto para estructuras de un solo nivel, que es igual a W_o

Las ordenadas espectrales a' y \tilde{a}' , sin y con efectos de interacción, respectivamente, se determinan de la siguiente manera:

$$a' = \frac{a}{R * Q'} \quad (3.7)$$

$$\tilde{a}' = \frac{\tilde{a}}{R * \tilde{Q}'} \quad (3.8)$$

Donde:

- a : Ordenada espectral elástica para el periodo Te y el amortiguamiento ξ_e (5 %) de la estructura con base rígida
- \tilde{a} : Ordenada espectral elástica para el periodo Te y el amortiguamiento de la estructura con base flexible
- Q' y \tilde{Q}' : Factores de reducción por comportamiento sísmico sin y con efectos de interacción
- \tilde{T}_e' y $\tilde{\xi}_e'$: Periodo y Amortiguamiento efectivos modificados

a) Caso dinámico modal

$$\tilde{V}_{o1} = \tilde{a}' * W_e \quad (3.9)$$

Donde \tilde{a}' se calcula para el periodo y amortiguamiento efectivos de dicho modo, y el peso modal efectivo.

Algunas consideraciones a tomar en cuenta en este apartado son:

- La diferencia entre la cortante inicial y la cortante modificada hallada en este capítulo no debe sobrepasar el $\pm 25\%$, en ambos casos.
 - Se debe hallar un factor igual al cociente entre la cortante basal modificada y la cortante basal original y este se aplica a las demás sollicitaciones (momentos volcane, momentos de volteo y momentos laterales). Cabe decir que, por la condición anterior, este factor no puede ser menor a 0.75 ni mayor a 1.25.
 - Cuando el periodo de la estructura sea mayor que el periodo de sitio, se espera un valor menor a 1, y cuando ocurra lo contrario, se espera un valor mayor a 1.
- **Desplazamientos laterales modificados del análisis interacción suelo - estructura**

La interacción suelo - estructura no solo modifica las fuerzas internas que recibe la estructura, sino que también modifica los desplazamientos laterales, pudiendo aumentarlos o

disminuirlos según sea el caso. Para ello, las NTC para Diseño Sísmico (2017) plantean las siguientes expresiones:

a) Caso estático

Los desplazamientos laterales se determinan con la siguiente expresión:

$$\tilde{X}_i = \frac{\tilde{V}_o}{V_o} * \left[X_i + \frac{V_o}{K_h} + (h_i + D) \frac{M_o}{K_r} \right] \quad (3.10)$$

Donde:

- M_o : Momento de volteo en la base de la cimentación
- X_i : Desplazamiento del i-ésimo nivel a la altura h_i sobre el desplante, calculado en la dirección de análisis con fuerzas sísmicas sin modificar por interacción suelo-estructura
- K_h y K_r : Rigidez de traslación y de rotación de la cimentación, respectivamente. Se definen como la fuerza y el momento necesarios para producir un desplazamiento horizontal y una rotación unitarios de la cimentación, respectivamente.

b) Caso dinámico

Los desplazamientos laterales se determinan con la siguiente expresión:

$$\tilde{X}_{i1} = \frac{\tilde{V}_{01}}{V_{01}} * \left[X_{i1} + \frac{V_{01}}{K_h} + (h_i + D) \frac{M_{01}}{K_r} \right] \quad (3.11)$$

Donde:

- V_{01} y M_{01} : Fuerza constante y momento de volteo en la base, respectivamente, correspondientes al modo fundamental en la dirección de análisis sin modificar por interacción suelo - estructura.
- \tilde{X}_{i1} : Desplazamiento del i-ésimo nivel a la altura h_i sobre el desplante, calculado usando el modo fundamental en la dirección de análisis con fuerzas sísmicas sin modificar por interacción suelo-estructura

c) Periodo y amortiguamiento efectivos

En la dirección de análisis, el periodo efectivo del sistema suelo - estructura se determinará como sigue:

$$\tilde{T}_e = \sqrt{T_e^2 + T_h^2 + T_r^2} \quad (3.12)$$

Donde:

- T_h : Periodo natural de la estructura asociado con una traslación horizontal de cuerpo rígido
- g : Aceleración de la gravedad

$$T_h = \frac{2\pi}{\sqrt{g}} \sqrt{\frac{W_e}{K_h}} \quad (3.13)$$

Donde:

- T_r : Periodo natural de la estructura asociado con una rotación de cuerpo rígido

$$T_r = \frac{2\pi}{\sqrt{g}} \sqrt{\frac{W_e * (H_e + D)^2}{K_r}} \quad (3.14)$$

En la dirección de análisis, el amortiguamiento efectivo del sistema suelo-estructura elástico se determinará con la expresión:

$$\xi_e' = \xi_e \left(\frac{T_e}{\tilde{T}_e}\right)^2 + \frac{\xi_h}{1 + 2\xi_h^2} \left(\frac{T_h}{\tilde{T}_e}\right)^2 + \frac{\xi_r}{1 + 2\xi_r^2} \left(\frac{T_r}{\tilde{T}_e}\right)^2 \quad (3.15)$$

Donde:

- ξ_e : Coeficiente de amortiguamiento para la estructura de base rígida

- ξ_h : Coeficiente de amortiguamiento del suelo en el modo de traslación horizontal

$$\xi_h = \frac{\pi \cdot C_h}{\tilde{T}_e \cdot K_h} \quad (3.16)$$

- ξ_r : Coeficiente de amortiguamiento del suelo en el modo de rotación

$$\xi_r = \frac{\pi \cdot C_r}{\tilde{T}_e \cdot K_r} \quad (3.17)$$

- C_h y C_r : Fuerza y momento necesarios para producir velocidades unitarias de la cimentación en traslación horizontal y rotación, respectivamente.

Las rigideces de los resortes elásticos K_h y K_r , y los coeficientes de los amortiguadores viscosos C_h y C_r , se obtienen de una tabla que depende de la frecuencia efectiva del sistema $\omega = 2\pi/\tilde{T}_e$.

Al tener en cuenta la interacción suelo estructura en el modelo, no solo las cargas y los desplazamientos sufren variaciones en sus resultados, sino también el periodo y el amortiguamiento del sistema, pues ahora se toma en cuenta el aporte del suelo. Este se da por medio constantes elásticas y de amortiguamiento calculadas y separadas según el modo para las cuales se calcularon, pudiendo ser rotacional y traslacional.

3. 1. 4. Norma rusa SNIP 2.02.05-87

Contempla un modelo dinámico que es determinado por factores de distribución de elementos verticales en el edificio y parámetros dinámicos del estudio de mecánica de suelo. Esto permite que los resultados sean más reales, específicos y conservadores. El análisis de esta norma abarca la descripción de la zonificación, tipos de suelo y el modelo dinámico que plantea la norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987). Finalmente, se determinan con exactitud los parámetros influyentes para el análisis suelo-estructura.

- **Zonificación**

Los parámetros sísmicos dependen de los Mapas Isoleísmales de Rusia, los cuales distribuyen al territorio ruso según la intensidad sísmica de la escala de Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK-64). Esta se usó para medir la intensidad de los terremotos en las tres regiones de la Federación de Rusia: Siberia, parte europea de Rusia y Lejano Oriente de Rusia. Sus grupos se distribuyen de la siguiente manera:

- Mapa A: 10% de probabilidad de excedencia sobre los índices mapeados de actividad sísmica dentro de un área determinada en un periodo de 50 años.

- Mapa B: 5% de probabilidad de excedencia sobre los índices mapeados de actividad sísmica dentro de un área determinada en un periodo de 50 años.
- Mapa C: 1% de probabilidad de excedencia sobre los índices mapeados de actividad sísmica dentro de un área determinada en un periodo de 50 años.

La distribución final que se eligió para la investigación son el grupo de Mapa A, ya que fueron los que más se parecen a la NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018), por tener 10% de probabilidad de excedencia para un periodo de 50 años. Los Mapas A Isoseísmales de Rusia son los siguientes:

- Rusia europea (mapa A)
- Siberia (mapa A)
- Extremo Oriente ruso (mapa A)



Figura 3.7. Rusia Europea, mapa A (SNIP, 2020)

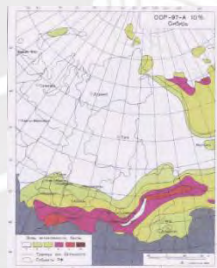


Figura 3.8. Siberia, mapa A (SNIP, 2020)

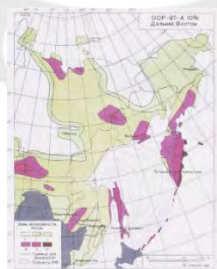


Figura 3.9. Extremo-oriente rusa, mapa A (SNIP, 2020)

Los mapas generados a partir de las intensidades se aplican a suelos de tipos de perfil estándar que se detalla en la norma rusa SNIP II-7-81 (2001) (Construcción en áreas sísmicas).

- **Tipos de suelo**

Tabla 3.3. Tipos de perfil de suelo según norma rusa SNIP II-7-81 (2001)

Tipos de perfiles de suelos	Suelos	Intensidad sísmica en zonas sísmicas		
		7	8	9
		Intensidad sísmica asignado a el sitio de construcción		
I	<ul style="list-style-type: none"> • Todo tipo de rocas (incluyendo permafrost y rocas permafrost descongelado); rocas no erosionadas y ligeramente erosionadas • Suelos gruesos y densos en kw-humedad de tipo magmático con hasta un 30 por ciento de inclusiones de arena y arcilla • Rocas erosionadas por la intemperie y por suelos no rocosos de permafrost con una temperatura negativa de 2 ° C o menos utilizados en la construcción y mantenimiento de acuerdo con el Principio I (conservación en un estado congelado de suelos en los lechos de cimentación) 	6	7	8
II	<ul style="list-style-type: none"> • Rocas erosionadas y muy erosionadas (incluidas las rocas de permafrost) excepto las clasificadas como Perfil de suelo tipo I • Arenas de granulometría grave, gruesa y mediana de densidad alta o media, baja humedad o húmedas; Línea de grano y arenas limosas, índice de densidad alto o medio, baja humedad; suelos arcillosos con índice de consistencia II <0.5 con razón de porosidad e <0.9 para arcillas y franco e <0.7 para arcillas arenosas • Permafrost Suelos no rocosos congelados sin cohesión y congelados sin cohesión con una temperatura del mismo superior a 2 ° C negativos utilizados en construcción y mantenimiento de acuerdo con el Principio I 	7	8	9
III	<ul style="list-style-type: none"> • Arenas sueltas sin importar la consistencia de humedad y el tamaño del grano • Arenas saturadas de grano grave, grueso y medio de arenas saturadas de grano alto o medio de densidad alta o media; tamaño de grano fino y arena seca y húmeda y saturada de densidad alta o media; suelos arcillosos con índice de consistencia II > 0.5 • Suelos arcillosos con índice de consistencia II <0.5 con razón de porosidad e > 0.9 para arcillas y franco e > 0.7 para arcillas arenosas • Uso de suelos no rocosos de permafrost en la construcción y mantenimiento de acuerdo con el principio I (se permite el deshielo de los suelos del lecho de cimentación) 	8	9	9

Cabe mencionar que Rusia ha desarrollado el modelo dinámico más amplio para el análisis suelo estructura considerando un suelo flexible (Gutierrez, 2019).

- **Interacción Suelo Estructura**

El modelo Dinámico propuesta por la norma rusa 2.02.05-87 (1987) establece cuatro coeficientes de rigidez. Primero, el coeficiente de rigidez de compresión elástica uniforme K_z en kN/m (ton/m); segundo, el coeficiente de rigidez de desplazamiento elástico uniforme K_x en kN/m (ton/m); tercero, compresión elástica no uniforme K_φ en kN.m (ton.m) y, cuarto, el

coeficiente de rigidez de desplazamiento elástico no uniforme K_ψ , en kN.m (ton.m). Estos coeficientes se definen a continuación.

$$K_z = C_z \cdot A \quad (3.18)$$

$$K_x = C_x \cdot A \quad (3.19)$$

$$K_\phi = C_\phi \cdot A \quad (3.20)$$

$$K_\psi = C_\psi \cdot A \quad (3.21)$$

Donde:

- A : Área de la base de la cimentación (m^2)

Además, para calcular el coeficiente de compresión elástica uniforme C_z en kN/m^3 (ton/m^3), se puede obtener a través de ensayos experimentales. Sin embargo, si no se tiene acceso a dichos ensayos, se puede obtener con la fórmula siguiente:

$$C_z = b_o \cdot E \left(1 + \sqrt{\frac{A_{10}}{A}} \right) \quad (3.22)$$

Donde:

- b_o : Coeficiente (m^{-1}) asumido para suelos arenosos igual a 1; para arenas arcillosas 1.2; para arcillas, cascajos, gravas, cantos rodados, arenas densas igual a 1.5.
- E : Módulo de deformación del suelo en la base de la cimentación, en kPa (ton/m^2), determinadas por la Tabla 2.2 y la Tabla 2.3 o en forma experimental.
- A_{10} : $10 m^2$

También, para el cálculo de los coeficientes de desplazamiento elástico uniforme C_x en kN/m^3 (ton/m^3); compresión elástica no uniforme C_ϕ en kN/m^3 (ton/m^3) y el desplazamiento elástico no uniforme C_ψ en kN/m^3 (ton/m^3), se calculan con las fórmulas siguientes:

$$C_x = 0.7C_z \quad (3.23)$$

$$C_\phi = 2C_z \quad (3.24)$$

$$C_{\psi} = C_z \quad (3.25)$$

Para la base de la cimentación, se deben considerar las amortiguaciones relativas ξ , que se pueden obtener de dos formas: 1) por ensayos de laboratorio o 2) la amortiguación relativa para vibraciones verticales ξ_z que se puede determinar de esta manera:

Primer caso: cuando las vibraciones establecidas (armónicas) o conocidas

$$\xi_z = \frac{z}{\sqrt{P_m}} \quad (3.26)$$

$$\left(\xi_z = \frac{0.7}{\sqrt{P_m}}\right) \quad (3.27)$$

Segundo caso: cuando las vibraciones no establecidas (impulsos) o desconocidas

$$\xi_z = 6 \cdot \sqrt{\frac{E}{C_z P_m}} \quad (3.28)$$

$$\left(\xi_z = 2 \sqrt{\frac{E}{C_z P_m}}\right) \quad (3.29)$$

Donde:

- E : Módulo de deformación del suelo en la base de la cimentación
- C_z : Coeficiente de compresión elástica uniforme
- P_m : Presión estática media en la base de la cimentación

$$P_m \leq \gamma_{ts} \cdot R \cdot I_L \quad (3.30)$$

Donde:

- γ_{ts} : Coeficiente de la condición de trabajo del suelo de fundación, asumido igual a 0.7 para arenas saturadas de grano fino o polvorosa y arcillas de consistencia movediza; y para el resto de suelos es igual a 1
- R : Resistencia de cálculo del suelo de fundación

Tabla 3.4. Resistencia de cálculo R para suelos grandes o de grano grueso norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987)

Suelos grandes o de grano grueso	R, KPa
Cascajos con agregados de:	
Arenas	600
Arcillas con Índice de fluidez	
$I_L \leq 0.5$	450
$0.5 < I_L \leq 0.75$	400
Gravas con agregados de :	
Arenas	500
Arcillas con Índice de fluidez	
$I_L \leq 0.5$	400
$0.5 < I_L \leq 0.75$	350

Tabla 3.5. Resistencia de cálculo R para suelos arenosos norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987)

Arenas	R, KPa (kg/cm²)	
	Densas	Medio densas
Grandes	600	500
Medianas	500	400
Pequeñas		
Poco húmedas	400	300
Húmedas y saturadas con agua	300	200
Polvorosas		
Poco húmedas	300	250
Húmedas	200	150
Saturadas con agua	150	100

Para el cálculo de las amortiguaciones relativas para las vibraciones horizontales y rotacionales respecto a sus ejes horizontal y vertical, se calculan con las fórmulas siguientes:

$$\xi_x = 0.6 \xi_z \quad (3.31)$$

$$\xi_\varphi = 0.5 \xi_z \quad (3.32)$$

$$\xi_\psi = 0.3 \xi_z \quad (3.33)$$

El módulo de amortiguación para las vibraciones verticales Φ_z es una característica de amortiguación y se puede calcular para dos casos siguientes:

- **Para las vibraciones establecidas (armónicas) o conocidas**

$$\Phi_z = \frac{1.6}{\sqrt{C_z}} \quad (3.34)$$

$$(\Phi_z = \frac{0.5}{\sqrt{C_z}}) \quad (3.35)$$

- **Para las vibraciones no establecidas (impulsos) o desconocidas**

Para las vibraciones horizontales y rotacionales respecto a sus ejes horizontal y vertical, se utilizan las siguientes fórmulas:

$$\Phi_x = 0.6\Phi_z \quad (3.36)$$

$$\Phi_\varphi = 0.5\Phi_z \quad (3.37)$$

$$\Phi_\psi = 0.3\Phi_z \quad (3.38)$$

3. 2. Propuesta de implementación de metodología para el análisis de interacción suelo-estructura

Luego de haber revisado por completo el marco teórico, se procede a realizar la implementación de metodología para considerar el fenómeno de interacción suelo - estructura en la Norma Peruana. A continuación, se plantean los criterios de comparación en los que se basa la propuesta, ordenados de mayor a menor influencia en los resultados:

Tabla 3.6. Criterios de comparación para la propuesta

Criterios de comparación	Descripción	Normas a comparar
Tipo de suelo	Este criterio es el que tiene mayor influencia sobre los resultados obtenidos. De una correcta clasificación de las propiedades del suelo dependen los resultados obtenidos con un modelo de la ISE.	<ul style="list-style-type: none"> • NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018) • Norma chilena 433 Diseño sísmico de edificios (2012) • Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Cimentaciones de la Ciudad de México (2017) • Norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987)
Modelo de ISE	El modelo de ISE tiene influencia directa sobre los resultados obtenidos. Se tomaron en cuenta solo las normas que tienen implementadas un modelo de interacción suelo-estructura.	<ul style="list-style-type: none"> • Norma Técnica Complementaria para Diseño por Sismo de la Ciudad de México (2017) • Norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987)

Se presentan los criterios de comparación mostrados en la tabla y se detalla, para cada uno, los conceptos tomados en cuenta de las normas:

- **Tipo de suelo**

La clasificación de suelos de la NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018) guarda relación con la norma chilena 433 de Diseño Sísmico de edificios (2012); ambas toman en cuenta las características del estrato obtenido del EMS. Por otro lado, la Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Cimentaciones de la Ciudad de México (2017) y la norma rusa SNIP II-7-81 (2001) clasifican los suelos en función de la topografía y geología de la zona.

- **Modelo de análisis de ISE**

El modelo de ISE de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la Ciudad de México (2017) plantea expresiones donde se modifican los valores de la respuesta de la estructura debido a solicitaciones externas, las cuales consideran las propiedades del suelo y la cimentación del proyecto. Sin embargo, plantea que el análisis de ISE es únicamente necesario para proyectos cuyas condiciones de suelo y estructuras cumplen con determinadas condiciones que deben ser verificadas.

Por otro lado, el modelo de la norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987), considera dos tipos de parámetros. Primero, considera parámetros que dependen del EMS y del tipo de edificación, que influyen en los cuatro tipos de rigideces que emplea para los cálculos. Segundo, considera el parámetro de la rotación vertical, el cual depende de la forma de distribución de elementos estructurales, como vigas, columnas y placas que también influyen en el resultado de dicha rigidez.

La Norma Chilena 433 Diseño sísmico de edificios (2012) no se entró en detalle, pues esta, a pesar de tener una sismicidad y geología parecida a la peruana, no propone consideraciones para el efecto de ISE. En cambio, las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la Ciudad de México (2017) y la norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987) sí contemplan el efecto ISE para el diseño sísmico de las edificaciones. En la última columna, se puede apreciar la propuesta a usar para considerar el efecto de ISE, para cada uno de los tipos de suelo de la NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018). Estos fueron escogidos en base a la similitud del suelo extranjero con el peruano y del detallado que brinda cada norma sobre cómo aplicar estas consideraciones.

Tabla 3.7 muestra la comparación necesaria para proponer el modelo de ISE para cada tipo de suelo según la NTE E.030 Diseño Sismorresistente. Se compara clasificación de suelos, similitudes entre la geología y las consideraciones de ISE que pueden poseer estas normas, además de que se presentan los parámetros utilizados para clasificar los suelos de la NTE E.030

Diseño sismorresistente (2018). Con la Norma Chilena 433 Diseño sísmico de edificios (2012) no se entró en detalle, pues esta, a pesar de tener una sismicidad y geología parecida a la peruana, no propone consideraciones para el efecto de ISE. En cambio, las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la Ciudad de México (2017) y la norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987) sí contemplan el efecto ISE para el diseño sísmico de las edificaciones. En la última columna, se puede apreciar la propuesta a usar para considerar el efecto de ISE, para cada uno de los tipos de suelo de la NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018). Estos fueron escogidos en base a la similitud del suelo extranjero con el peruano y del detallado que brinda cada norma sobre cómo aplicar estas consideraciones.

Tabla 3.7. Propuesta preliminar de interacción suelo – estructura para suelos peruanos

	Norma chilena 433 Diseño sísmico de edificios (2012)	Norma Técnica Complementaria de la Ciudad de México (2017)	Norma rusa SNIP II-7-81 (2001)	Propuesta
Tipo de suelo				
S0: Roca dura		La zona I (de Lomas) posee características similares, debido a su composición de rocas sanas y ciertos depósitos cohesivos. No contiene más detalles sobre el efecto de ISE.	Perfil de suelo tipo I ; sin embargo, el suelo ruso tipo I considera además rocas y permafrost que conservan un estado congelado de - 2°C a menos, que se encuentren en los lechos de cimentación.	Para este tipo de suelo ninguna norma contempla el efecto ISE
S1: Roca o suelos muy rígidos		Ciertos suelos de la Zona I de la norma técnica complementaria de la ciudad de México (2017) pueden ser comparados a los descritos en la zona S1 y S2, mas no provee más detalles sobre el efecto ISE para este tipo de suelo	Semejanzas con el perfil de suelo tipo II de la norma rusa. La norma Rusa si establece en el análisis estructural efectos de ISE	Norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987).
S2: Suelos intermedios	No propone el uso de ISE en Chile.			
S3: Suelos blandos		Se encuentran grandes similitudes con las zonas II (de transición) y III (de lagunas) de la norma técnica complementaria de la ciudad de México.	El suelo tipo III de la norma rusa SNIP II-7-81 (2001) coincide con las características del suelo tipo S3 de la NTE E.030 (2018).	Norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987).
S4: Condiciones excepcionales		Esta sí contempla el efecto ISE a través de la adición de los efectos de la interacción cinética y la interacción inercial.	No existe similitud en este tipo de suelo.	Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la Ciudad de México (2017)

Como se puede observar en la Tabla 3.8, no se aprecia consideraciones para el tipo de suelo S0, esto debido a que en ninguna norma se considera el efecto de ISE. La causa más probable para esto es el alto grado de rigidez que este tipo de suelo y sus contrapartes extranjeras

poseen. Para los tipos de suelo restantes, se presentan los parámetros necesarios para considerar el efecto de ISE y la norma usada para ello. Por ejemplo, para el tipo de suelo S1, S2 y S3 se puede usar la norma rusa SNIP II-7-81 (2001) y para el tipo de suelo S4; Norma Técnica Complementaria para Diseño por Sismo de la Ciudad de México (2017). Además, se presentan los parámetros referenciados para cada caso de uso según el tipo de suelo.

Para el tipo de Suelo S1, se pueden usar los siguientes parámetros de la norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987):

- Rigideces

Para el tipo de Suelo S2, se pueden usar los siguientes parámetros de la norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987):

- Coeficiente de compresión elástica uniforme
- Módulo de la deformación del suelo en la base de la cimentación

Para el tipo de Suelo S3, se pueden usar los siguientes parámetros de la norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987):

- Coeficiente de desplazamiento elástico uniforme
- Compresión elástica no uniforme
- Desplazamiento elástico no uniforme
- Amortiguaciones relativas por ensayos de laboratorios
- La amortiguación relativa para vibraciones verticales
- Presión estática media en la base de la cimentación
- Coeficiente de la condición de trabajo del suelo de la fundación
- Resistencia de cálculo del suelo de fundación
- Amortiguaciones relativas para las vibraciones horizontales y rotacionales respecto a sus ejes horizontal y vertical
- Módulo de amortiguación para las vibraciones verticales

Para el tipo de Suelo S4, se pueden usar los siguientes parámetros de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la Ciudad de México (2017):

- Parámetros de reducción de comportamiento sísmico
- Periodo y amortiguamiento efectivos
- Coeficiente de amortiguamiento del suelo rotacional y traslacional
- Coeficientes de amortiguamiento viscosos

Tabla 3.8. Parámetros de la propuesta preliminar de interacción suelo – estructura para suelos peruanos

Suelos Peruanos	Propuesta	Parámetros a comprobar por experimentación o fórmulas
S0: Roca dura	Para este tipo de suelo ninguna norma contempla el efecto ISE	---
S1: Roca o suelos muy rígidos		<ul style="list-style-type: none"> Rigidez: (3.18), (3.19), (3.20) y (3.21)
S2: Suelos intermedios		<ul style="list-style-type: none"> Coficiente de compresión elástica uniforme: C_z en kN/m^3 (ton/m^3), (3.22) b_0: Coficiente (m^{-1}) E: Módulo de deformación del suelo en la base de la cimentación, en kPa (ton/m^2) Coficientes de desplazamiento elástico uniforme C_x en kN/m^3 (ton/m^3), (3.23) Compresión elástica no uniforme C_ϕ en kN/m^3 (ton/m^3), (3.24) Desplazamiento elástico no uniforme C_ψ en kN/m^3 (ton/m^3), (3.25)
S3: Suelos blandos	Norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987)	<ul style="list-style-type: none"> Amortiguaciones relativas: 1) por ensayos de laboratorio o 2) la amortiguación relativa para vibraciones verticales fórmulas (3.26), (3.27), (3.28) y (3.29). P_m: Presión estática media en la base de la cimentación. T_s: Coficiente de la condición de trabajo del suelo de fundación. R: Resistencia de cálculo del suelo de fundación (Tabla 3.4) y (Tabla 3.5). Cálculo de las amortiguaciones relativas para las vibraciones horizontales y rotacionales respecto a sus ejes horizontal y vertical, se calculan con las fórmulas siguientes: (3.31), (3.32) y (3.33) El módulo de amortiguación para las vibraciones verticales Φ_z es una característica de amortiguación y se puede calcular para dos casos siguientes: (3.34), (3.35), (3.36), (3.37) y (3.38).
S4: Condiciones excepcionales	Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la Ciudad de México (2017)	<ul style="list-style-type: none"> Cortante basal modificada (\tilde{V}_0 y \tilde{V}_{01}) (3.6) y (3.9) Ordenadas espectrales elásticas (a' y \tilde{a}') (3.7) y (3.8) Periodo y amortiguamiento efectivos modificados (\tilde{T}_e y $\tilde{\xi}_e'$) (3.12) y (3.15) Período natural de la estructura asociación con una traslación o rotación (T_h y T_r) (3.13) y (3.14) Coficiente de amortiguamientos efectivos en el modo de traslación horizontal o rotación (ξ_h y ξ_r) (3.16) y (3.17)

Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo, se detallan las conclusiones y recomendaciones relevantes de esta investigación.

4.1. Conclusiones

- Con respecto a la NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018) y la Norma Chilena 433 Diseño sísmico de edificios (2012), se concluye que ambas normas no incluyen algún capítulo en específico sobre la interacción suelo - estructura. Asimismo, debido a que ambos países son vecinos y pertenecen al denominado “cinturón de fuego del Pacífico”, se puede encontrar una clasificación de tipo similar entre ambas normas. La NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018) clasifica 5 tipos de suelos (S0, S1, S2, S3 y S4), mientras que la Norma Chilena 433 Diseño sísmico de edificios (2012) los clasifica en 6 (A, B, C, D, E y F). El criterio de clasificación de los suelos también es similar; es decir, se usan las mismas propiedades para realizar la clasificación, por ejemplo, el índice de penetración estándar (\overline{N}_{60}) y la velocidad de onda de corte equivalente de los 30 metros superiores de ($V_s 30$).
- Con respecto a la norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987), se concluye que es una de las normas que incluye el fenómeno de interacción suelo - estructura y cuyas hipótesis y ecuaciones son similares a las planteadas por el modelo dinámico de D.D. Barkan.
- Se puede observar que tanto en la norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987), como Norma Técnica Complementaria para Diseño por Sismo de la Ciudad de México (2017), no se encuentran consideraciones para el efecto de ISE en determinados perfiles de suelo. Estos perfiles de suelos son: El perfil tipo I de la norma rusa SNIP II-7-81 (2001) y la zona I (de Lomas) de las Norma Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la Ciudad de México (2017). Ambos poseen grandes similitudes, pues son en su mayoría conformados por rocas sanas y rocas ligeramente erosionadas, característica que comparten con el tipo de suelo S0 de la NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018). Por ende, se concluye que, para este tipo de suelos, no es necesario considerar el efecto de ISE.
- De acuerdo con lo investigado, podemos cotejar que el suelo tipo II de la norma rusa SNIP II-7-81 (2001) coincide con las características del tipo de suelo S1 y S2 de la NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018). Además, el suelo tipo III de la norma rusa SNIP II-7-81 coincide con el suelo S3 de la NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018). La norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987) establece la aplicación del efecto de ISE en ambos

tipos de suelos. Por ello, es recomendable que, para la consideración de dicho efecto en la NTE E.030 Diseño Sismorresistente, se pueda realizar utilizando la metodología de la norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987) solo para dichos suelos.

- Debido a que la zona III (de Lago) indicada en la Norma Técnica Complementaria de Diseño y Construcción de Cimentaciones de la Ciudad de México (2017), posee estratos de suelo cohesivos altamente compresibles, se pudo aprovechar esta similitud con el tipo de suelo S4 peruano para ofrecer una alternativa de propuesta para dicho suelo.

4. 2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar ensayos experimentales para poder determinar adecuadamente el fenómeno de interacción suelo estructura en la NTE E.030 Diseño Sismorresistente, ya que muchos de los modelos dinámicos mencionados anteriormente utilizan coeficientes experimentales desarrollados en otros países como Rusia.
- Se recomienda introducir un capítulo el cual considere el fenómeno de interacción suelo estructura en la NTE E.030 Diseño Sismorresistente y la NTE E.050 Suelos y Cimentaciones.
- Se recomienda utilizar el modelo dinámico de la norma rusa SNIP 2.02.05-87 (1987) en la interacción suelo – estructura en Perú para suelos tipo S1, S2, S3 de la NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018), ya que este modelo incluye parámetros de rigidez horizontal y parámetros verticales que logran un resultado más real para el diseño de elementos de la cimentación. De la misma manera, se recomienda usar la Norma Técnica Complementaria para Diseño por Sismo de la Ciudad de México para el tipo de suelo S4. Esto debido a la gran similitud entre los tipos de suelos existentes en ambos países.

Capítulo 5. Bibliografía

Gaceta Oficial de la Ciudad de México (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo*.

Gaceta Oficial de la Ciudad de México (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones*.

Gesto de Dios, R. (2006). Geotecnia y Cimientos. Sevilla: DeMecánica por GestoDeDios. <http://www.demecanica.com/Geotecnia/geotecnia.htm>

GUTIERREZ RODRIGUEZ MARCOS RUBEN 2019. *Interacción suelo-estructura en base a modelos dinámicos – norma rusa SNIP 2.02.05-87 y A.E. Sargsian*. P.4.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN -INN CHILE (2012). *Norma Chilena Oficial 433 de Diseño Sísmico de edificios*

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN -INN CHILE (2012). *Norma Chilena Oficial 1508 de Estudio de Mecánica de Suelos*

Jines Cabezas, R. M. (2017). Interacción Sísmica Suelo-Estructura en Edificaciones de Sistema Dual en la Ciudad de Moquegua. *Universidad Privada de Tacna. Perú*.

Mejía Bermejo, L. A. (2017). Interacción Dinámica Suelo-Estructura. Universidad Autónoma de México, México.

Meza Rodríguez, J. A., & Valderrama Carpio, C. J. (2014). Influencia de la interacción suelo-estructura en la reducción de esfuerzos de una edificación aporricada con zapatas aisladas. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Perú

Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento - SENCICO (2018). *Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente*.

Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento - SENCICO (2018). *Norma Técnica E.050 Suelos y Cimentaciones*.

Sagastegui, F., & Villarreal, G. (2013). *Interaccion Sísmica Suelo-Estructura y su Impacto Ambiental en Edificaciones con Zapatas Aisladas. Pueblo Contenido, 1-8*.

SNIP (2020). Engineering Data. *Isoseismal Maps Of Russia*. Consulta: 21/11/2020. Recuperado de <http://snip.com/index.php?Page=seismic>

SNIP (2001). SNIP II-7-81. Construction in seismic areas. Recuperado de www.snip.com

SNIP (1987). SNIP 2.02.05-87. Modelo dinámico norma rusa. Recuperado de www.snip.com

Soriano, A. (1989). Modificación del movimiento. *A. Soriano, Interacción Suelo Estructura.*

Villarreal Castro, G. (2020). *Interacción sísmica suelo-estructura en edificaciones con zapatas aisladas.* Lima, Perú

Yepes Piqueras, V. (2020). *Procedimientos de construcción de cimentaciones y estructuras de contención.* Editorial Universidad Politécnica de Valencia.

