

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**INFLUENCIA DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA EN LA
RESPUESTA SÍSMICA DE UN EDIFICIO DE OFICINAS DE 6 PISOS Y 2
SÓTANOS CONSIDERANDO DIFERENTES CONDICIONES DE SUELO**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Civil

AUTORAS:

Grecia Chijeí Prada Conde

Isabel Thalia Mateo Suarez

ASESOR:

Christian Alberto Asmat Garaycochea

Lima, 2022

Declaración jurada de autenticidad

Yo, Christian Alberto Asmat Garaycochea, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulado

INFLUENCIA DE LA INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA EN LA RESPUESTA SISMICA DE UN EDIFICIO DE OFICINAS DE 6 PISOS Y 2 CONSIDERANDO DIFERENTES CONDICIONES DE SUELO

de las autoras


Grecia Chijei Prada Conde

Isabel Thalia Mateo Suarez

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 15%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 14/12/2022.
- He revisado con detalle dicho reporte y confirmo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio alguno.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 14 de diciembre del 2022

Apellidos y nombres del asesor: Asmat Garaycochea, Christian Alberto	
DNI: 45650009	Firma 
ORCID: 0000-0003-3893-4573	

A mis padres y mi hermana por haberme acompañado y apoyado durante mi formación profesional; muchos de mis logros se los debo a ustedes, ya que me motivaron constantemente para alcanzar mis sueños. Gracias por confiar siempre en mí.

Grecia Prada

A todos los profesores que compartieron sus conocimientos y experiencia durante nuestra formación. En especial, al ingeniero Christian Asmat por habernos guiado en este proceso con sus enseñanzas, compromiso y tiempo.

A Dios, por acompañarme siempre y darme fuerzas para obrar día a día. A mis padres Efrain y María por brindarme su apoyo incondicional y consejos para hacer de mí una persona íntegra. A mi hermano Miguel por motivarme siempre a ser un ejemplo como estudiante.

Isabel Mateo

RESUMEN

La presente investigación consiste en estudiar la respuesta sísmica de un edificio de oficinas de 6 pisos y 2 sótanos considerando la interacción suelo-estructura (ISE). Se ha visto que en la realidad se utilizan frecuentemente modelos con base empotrada a nivel del terreno, pese a que, se analicen edificios con sótanos. Esta idealización genera que los resultados obtenidos en el análisis estructural no sean muy precisos. Es por tal motivo, que el objetivo de la investigación es determinar la influencia de la ISE en la respuesta sísmica de un edificio de oficinas con sótanos, para lo cual se plantean tres casos de estudio para comparar los resultados considerando diferentes tipos de modelos, tipos de suelo e incluir la ISE dentro del análisis. Existen normas internacionales que presentan procedimientos para el análisis con ISE y también, diversos investigadores han planteado modelos matemáticos para caracterizarla, los cuales permiten representar respuestas cercanas al movimiento del suelo circundante a las cimentaciones. A partir de lo mencionado se establecen los tres casos de estudio que se desarrollaron en la presente investigación. El primer caso de estudio (modelo 01) consta de un edificio empotrado a nivel de superficie sin el modelado de los sótanos. El segundo caso de estudio se divide en dos escenarios, que se diferencian en las restricciones que se les asignan a los muros de los sótanos. El primer escenario (modelo 02A) consiste en el edificio con sótanos empotrado a nivel de cimentación. En el segundo escenario (modelo 02B), se tiene un modelo similar al anterior, incluyendo en los sótanos una restricción del movimiento traslacional del suelo. El último caso (modelo 03) consta en el edificio con sótanos y el suelo representado mediante un elemento sólido, en este modelo se caracteriza la ISE, representando al suelo mediante un modelo de semiespacio elástico lineal compuesto por elementos finitos sólidos. Para cada uno de los casos expuestos, de acuerdo a la norma E.030, se realizan los análisis estático y dinámico; con lo cual, se obtienen parámetros como: Periodos, cortantes basales, modos de vibración, desplazamiento y desplazamientos relativos de entrepiso.

Palabras clave: interacción suelo estructura, método de elementos finitos, modelo de semiespacio elástico lineal, análisis sísmico.

ABSTRACT

The present research consists of studying the seismic response of a six-story office building and two story basements considering the soil-structure interaction (ISE). It has been seen that in reality models with a built-in base at ground level are frequently used, despite the fact that buildings with basements are analyzed. This idealization means that the results obtained in the structural analysis are not very accurate. For this reason, the objective of the research is to determine the influence of the ISE on the seismic response of an office building with basements. Therefore, three case studies are proposed to compare the results considering different types of models, types of soil and include the ISE within the analysis. There are international standards that present procedures for the analysis with ISE and furthermore, several researchers have proposed mathematical models to characterize it. These models can represent close responses to the motion of the soil surrounding the foundations. Hence, the three case studies that were developed in the present research are established. The first case of study (model 01) consists of a built-in building at surface level without the modeling of the basements. The second case study is divided into two scenarios, with differences in the restrictions assigned to the basement walls. The first scenario (model 02A) consists of the building with basements embedded at foundation level. In the second scenario (model 02B), there is a model similar to the previous one, including a restriction of the translational motion of the soil in the basements. The last case (model 03) consists in the building with basements and the soil represented by a solid element, in this model the ISE is characterized, representing the soil by a linear elastic half-space model composed of solid finite elements. For all cases, according to standard E.030, static and dynamic analysis are evaluated; in order to get parameters such as: Periods, basal shears, modes of vibration, displacement and story drift.

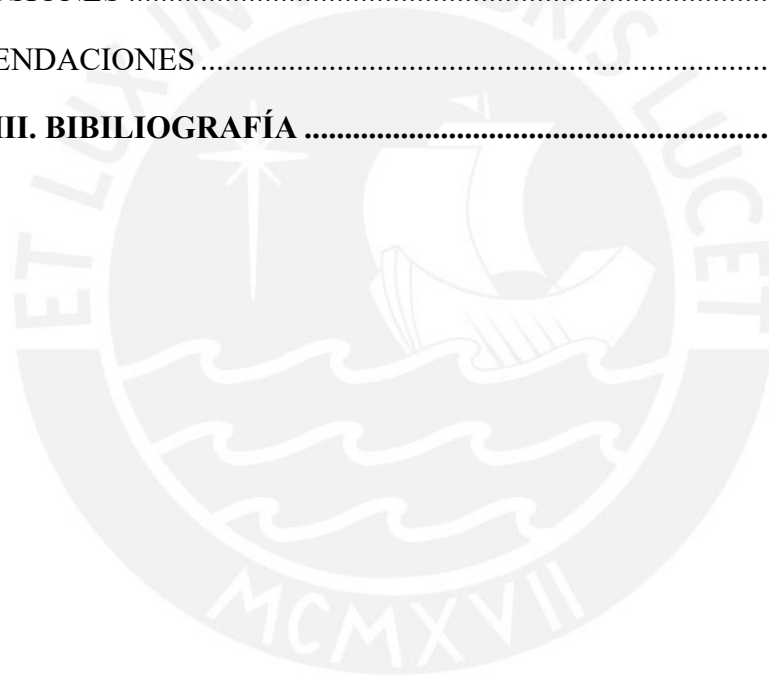
Keywords: soil-structure interaction, finite elements method, linear elastic half-space model, seismic analysis.

ÍNDICE

CAPÍTULO I. GENERALIDADES	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. OBJETIVO GENERAL:	2
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	3
1.3. HIPÓTESIS.....	3
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.5. ALCANCE	3
1.6. METODOLOGÍA	4
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	5
2.1. ANTECEDENTES.....	5
2.2. CONCEPTOS BÁSICOS.....	6
2.2.1. INGENIERÍA SISMORRESISTENTE.....	6
2.2.2. RIESGO SÍSMICO.....	7
2.2.3. ANÁLISIS ESTRUCTURAL	8
2.2.4. MODELO DE ANÁLISIS.....	9
2.3. INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA	10
2.3.1. CONCEPTOS BÁSICOS	10
2.3.1.1. INTERACCIÓN INERCIAL.....	11
2.3.1.2. INTERACCIÓN CINEMÁTICA	12
2.3.1.3. EFECTOS DE LA FLEXIBILIDAD SUELO-CIMENTACIÓN.....	12
2.3.2. MODELOS MATEMÁTICOS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA....	13
2.3.2.1. MODELOS MATEMÁTICOS DE INTERACCIÓN ESTÁTICA SUELO-ESTRUCTURA	13
2.3.2.2. MODELOS MATEMÁTICOS DE INTERACCIÓN DINÁMICA SUELO-ESTRUCTURA	16

2.4. MÉTODOS PARA EVALUAR PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO	18
2.5. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	19
CAPÍTULO III. MARCO NORMATIVO	21
3.1. NORMA E.020.....	21
3.2. NORMA E.030.....	22
3.2.1. ANÁLISIS ESTÁTICO.....	22
3.2.2. ANÁLISIS DINÁMICO.....	24
3.3. NORMAS INTERNACIONALES	24
3.3.1. FEMA 2091	24
3.3.2. NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO POR SISMO (2017) - MÉXICO	26
CAPÍTULO IV. ESTUDIO DE CASOS	30
4.1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO.....	30
4.2. PARAMETROS DE SITIO	31
4.3. CONDICIONES INICIALES DEL MODELADO.....	31
4.4. CONDICIONES PARA EL MODELADO DEL SUELO.....	32
4.5. OTRAS CONSIDERACIONES DEL MODELADO.....	36
4.6. MODELO 01: BASE EMPOTRADA SIN SÓTANOS.....	37
4.7. MODELOS 02.....	38
4.7.1. MODELO 02A: CON SÓTANOS, SIN CONFINAMIENTO	38
4.7.2. MODELO 02B: CON SÓTANOS, CON CONFINAMIENTO.....	39
4.8. MODELO 03: CON ISE	40
CAPÍTULO V. RESULTADOS	42
5.1. RESULTADOS DE ANÁLISIS ESTÁTICO PARA LOS CASOS DE ESTUDIO	47
5.2. RESULTADOS DE ANÁLISIS DINÁMICO PARA LOS CASOS DE ESTUDIO	53
5.2.1. RESULTADOS PARA SUELO TIPO S1.....	56
5.2.2. RESULTADOS PARA SUELO TIPO S2.....	61

5.2.3. RESULTADOS PARA SUELO TIPO S3.....	66
CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	72
6.1. DETERMINACIÓN DE LA IMPORTANCIA DE LA INTERACCIÓN SUELO- ESTRUCTURA.....	72
6.2. COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS SEGÚN TIPO DE SUELO	73
6.3. COMPARACIÓN DE DERIVAS MÁXIMAS SEGÚN TIPO DE SUELO.....	75
6.4. COEFICIENTES PARA EDIFICIOS CON 2 SÓTANOS Y HASTA 6 PISOS	76
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78
7.1. CONCLUSIONES	78
7.2. RECOMENDACIONES	79
CAPÍTULO VIII. BIBLIOGRAFÍA	81



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Zonas Sísmicas del Perú.....	8
Figura 2. Modelo de un edificio de 8 niveles y 4 sótanos en el programa ETABS.....	9
Figura 3. Representación del movimiento a campo libre del suelo y su relación con la interacción cinemática e inercial.....	13
Figura 4. Modelo de Winkler.....	13
Figura 5. Modelo de Pasternak.....	14
Figura 6. Modelo de Vlaslov-Leontiev.....	15
Figura 7. Modelo de V.A. Illivech.....	17
Figura 8. Ilustración esquemática de un análisis directo de la interacción suelo-estructura usando modelado continuo por elementos finitos.....	20
Figura 9. Representación de un edificio de grande planta y un edificio de igual altura con menor tamaño de planta.....	25
Figura 10. Representación de un edificio con sótanos y un edificio sin cimentación profunda.....	25
Figura 11. Representación del coeficiente de balasto y curva Presión del suelo vs. Deformación vertical.....	33
Figura 12. Valores de Coeficiente de Poisson.....	34
Figura 13. Modelo estructural con base empotrada y sin sótanos.....	37
Figura 14. Vista en planta del 4to piso del Modelo 01.....	38
Figura 15. Modelo estructural 2A con sótanos y sin confinamiento en las paredes de los sótanos.....	39
Figura 16. Modelo estructural 3 con sótanos y con confinamiento en los muros de los sótanos.....	40
Figura 17. Modelo estructural 3 con sótanos y modelado del suelo.....	40
Figura 18. Vista en planta de sótano 1 del Modelo estructural 3.....	41
Figura 19. Períodos fundamentales de la estructura según modelo y tipo de suelo para sismo en YY.....	53
Figura 20. Períodos fundamentales de la estructura según modelo y tipo de suelo para sismo en XX.....	54
Figura 21. Fuerzas cortantes basales para sismo en X según tipo de suelo y caso de estudio.	
Figura 22. Fuerzas cortantes basales para sismo en Y según tipo de suelo y caso de estudio.	

Figura 23. Derivas inelásticas para suelo S1 en X-X según caso de estudio y altura del edificio	57
Figura 24. Desplazamientos absolutos inelásticos para suelo S1 en X-X según caso de estudio y altura del edificio.	58
Figura 25. Derivas de entrepiso inelásticas para suelo S1 en Y-Y según caso de estudio y altura del edificio.	59
Figura 26. Desplazamientos absolutos inelásticos para suelo S1 en Y-Y según caso de estudio y altura del edificio.	60
Figura 27. Derivas inelásticas para suelo S2 en X-X según caso de estudio y altura del edificio.	62
Figura 28. Desplazamientos absolutos inelásticos para suelo S2 en X-X según caso de estudio y altura del edificio	63
Figura 29. Derivas inelásticas para suelo S2 en Y-Y según caso del estudio y altura del edificio.	64
Figura 30. Desplazamientos absolutos inelásticos para suelo S2 en Y-Y por caso de estudio y altura del edificio.	65
Figura 31. Derivas inelásticas para suelo S3 en X-X por caso de estudio y altura del edificio.	67
Figura 32. Desplazamientos absoluto elástico para suelo S3 en X-X por caso de estudio y altura del edificio	68
Figura 33. Derivas inelásticas para suelo S3 en Y-Y por caso de estudio y altura del edificio.	69
Figura 34. Desplazamientos absolutos inelásticos para suelo S3 en Y-Y por caso de estudio y altura del edificio	70
Figura 35. Desplazamientos máximos en la azotea por tipo de suelo con dirección de sismo X.....	74
Figura 36. Desplazamientos máximos en la azotea por tipo de suelo en dirección de sismo Y.	74
Figura 37. Derivas máximas por tipo de suelo en dirección de sismo X.....	75
Figura 38. Derivas máximas por tipo de suelo en dirección de sismo Y.....	76
Figura 39. Coeficientes escala para desplazamientos y derivas inelásticas en sismo en X y Y.	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Pesos unitarios y cargas repartidas por carga muerta según norma E.020	21
Tabla 2. Cargas vivas según norma E.020	21
Tabla 3. Factores de Zonificación “Z”	22
Tabla 4. Factores de suelo “S”	23
Tabla 5. Períodos TP y TL	23
Tabla 6. Clasificación de los perfiles del suelo.....	32
Tabla 7. Módulo de balasto según Terzagui.	33
Tabla 8. Valores de Módulo de elasticidad y módulo de Poisson	35
Tabla 9. Valores de módulo de corte.	35
Tabla 10. Parámetros sísmicos Z3 y S1	42
Tabla 11. Parámetros sísmicos Z3 y S2	43
Tabla 12. Parámetros sísmicos Z3 y S3	43
Tabla 13. Resultados para Sismo en XX - Dirección en XX para Z3S1	44
Tabla 14. Resultados para Sismo en YY - Dirección en YY para Z3S1.	44
Tabla 15. Irregularidad de rigidez lateral en la dirección XX	44
Tabla 16. Irregularidad de rigidez lateral en la dirección YY	45
Tabla 17. Irregularidad de masa o peso	45
Tabla 18. Irregularidad por torsión en la dirección XX.....	45
Tabla 19. Irregularidad por torsión en la dirección YY.....	46
Tabla 20. Verificación de un sistema de muros	46
Tabla 21. Participación modal del modelo 02A.....	47
Tabla 22. Coeficiente sísmico, períodos y cortante estática y dinámica del modelo 2A para sismo en XX con suelos S1, S2 y S3	48
Tabla 23. Coeficiente sísmico, períodos y cortante estática y dinámica del modelo 2A para sismo en YY con suelos S1, S2 y S3	48
Tabla 24. Participación modal del modelo 2B.....	49
Tabla 25. Coeficiente sísmico, períodos y cortante estática y dinámica del modelo 2B para sismo en XX con suelos S1, S2 y S3	50
Tabla 26. Coeficiente sísmico, períodos y cortante estática y dinámica del modelo 2B para sismo en YY con suelos S1, S2 y S3	50
Tabla 27. Participación modal del modelo 03	51

Tabla 28. Coeficiente sísmico, períodos y cortante estática y dinámica del modelo 03 para sismo en XX con suelos S1, S2 y S3	52
Tabla 29. Coeficiente sísmico, períodos y cortante estática y dinámica del modelo 03 para sismo en YY con suelos S1, S2 y S3	52
Tabla 30. Determinación de la importancia de la interacción suelo – estructura	73



CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

El peligro sísmico que afronta el Perú se debe principalmente a su zonificación en el Anillo de Fuego del Pacífico, que alberga el 90% de actividad sísmica mundial. En particular, este corresponde a la proximidad a los bordes de subducción entre las placas tectónicas Nazca y Sudamericana, y a los fenómenos que se producen entre ellas. Como resultado de estos sucesos, se generan eventos sísmicos de diferentes magnitudes y con ellos, desde pérdidas económicas hasta daños irreparables en edificaciones y pérdidas de vidas.

De acuerdo con Muñoz (2018), el peligro sísmico consiste en la severidad de los sismos en una zona determinada, la cual presenta características y cierta topografía local; mientras que riesgo sísmico se refiere a los daños presentes en una estructura como producto del peligro que la amenaza y de su vulnerabilidad. En este sentido, una rama de la ingeniería civil que estudia la respuesta de las estructuras ante la acción sísmica e investiga metodologías para el cálculo estructural es la ingeniería sismorresistente (Villarreal, 2006a). El principal objetivo de esta rama es la disminución de pérdidas humanas y daños materiales durante los terremotos. No obstante, a lo largo del desarrollo de esta disciplina se han establecido otros objetivos que buscan evitar el colapso de estructuras en terremotos severos y reducir los daños en sismos frecuentes de menor severidad (Muñoz, 2018).

Debido a la diferencia de daños según la intensidad de “sacudidas sísmicas” en zonas con características similares, se cuenta con la clasificación de suelos a partir de sus propiedades mecánicas, períodos de vibración y velocidad de propagación de las ondas de corte, dada por la Norma de Diseño Sismorresistente E.030. En dicha clasificación, se encuentran suelos muy rígidos, suelos intermedios, suelos flexibles y de condiciones excepcionales. En cuanto al análisis y diseño estructural, en la práctica se suelen realizar simplificaciones de los modelos para agilizar su análisis, teniendo resultados satisfactorios. Una de las simplificaciones que se usa cotidianamente es la de considerar el cimiento de una estructura como rígido, representada por un apoyo empotrado a nivel de cimentación. Esto representa la existencia de un empotramiento perfecto entre las columnas y/o muros estructurales y el suelo. Sin embargo, esta consideración sólo es representativa cuando la estructura se encuentra cimentada sobre un suelo rígido y cimentación rígida; lo cual en la realidad no se cumple en todas las estructuras.

La simplificación en el análisis y diseño estructural desprecia la interacción que presentaría el suelo con la estructura. Por ello, es importante analizar el movimiento superficial del terreno durante un sismo para proyectar estructuras que sean sometidas a tales movimientos (Soriano, 1989). Cabe recalcar que, el movimiento del suelo sin presencia de una estructura es diferente al comportamiento que tendría con una. En este sentido, el escenario en el cual la estructura influye en el movimiento del suelo es representado por el mecanismo de interacción suelo-estructura (ISE) (Soriano, 1989).

Por consiguiente, dicha interacción puede llegar a modificar las propiedades dinámicas de una estructura con una cimentación rígida e indeformable, y las características del movimiento del terreno adyacente a la cimentación (Avilés & Fernández, 2004). Por lo que los resultados ante un evento sísmico pueden aumentar o disminuir si se considera la ISE en el análisis. Existen varios modelos matemáticos que buscan representar la ISE, los cuales incluyen fenómenos estáticos y dinámicos. Uno de los modelos que la representa es el modelo del semiespacio elástico lineal deformable, en el cual se define la deformación del suelo lineal a lo largo de la profundidad de sus estratos (Villarreal, 2009a).

Bajo la premisa anterior, en el presente estudio, el suelo se asimila a un medio continuo y elástico, que será modelado tridimensionalmente por elementos finitos. Asimismo, se estudian tres casos realizando análisis estático y dinámico. Este último será un análisis modal espectral según las condiciones establecidas en la norma E.030. Un parámetro que será importante en el presente estudio es el tipo de suelo, el cual es determinado por la norma E.030, que establece los tipos de suelo S1, S2 y S3.

En síntesis, el propósito de la presente investigación es exponer la importancia de la ISE en el análisis estructural, mediante la comparación de los resultados que tendría una estructura si se considera este efecto en su análisis y variando el tipo de suelo. De este modo, se puede determinar la influencia que tiene y establecer en qué casos es relevante tomar en cuenta esta condición en el análisis.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL:

Determinar la influencia de la interacción suelo estructura en la respuesta sísmica de un edificio de oficinas de 6 pisos y 2 sótanos considerando diferentes condiciones de suelo.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Estimar la respuesta de un edificio de oficinas mediante un análisis estático y un análisis modal espectral para cada caso de estudio variando el tipo de suelo.
- Determinar el comportamiento dinámico de la estructura considerando interacción suelo-estructura mediante la aplicación del método de elementos finitos (MEF).
- Comparar la variación del comportamiento dinámico de la estructura en función de las propiedades de los suelos.
- Determinar la importancia de la interacción suelo-estructura en estructuras con sótanos.

1.3. HIPÓTESIS

Al considerar la interacción suelo-estructura y variar el tipo de suelo sobre el que está cimentado un edificio de 6 pisos y 2 sótanos, se evidencia que los parámetros estudiados en el análisis sísmico de este, serán mayores en un 30% en comparación a un análisis considerando empotrada a nivel de superficie.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Aún son escasas las investigaciones que evalúan o proponen modelos matemáticos que puedan predecir respuestas de la estructura ante eventos sísmicos considerando la ISE. Asimismo, las propiedades mecánicas del suelo no son estudiadas dentro del análisis y diseño de edificaciones por la normativa peruana; no obstante, los efectos de la ISE cambian las propiedades dinámicas de un sistema estructural.

Por estas razones, la investigación pretende desarrollar una comparación de las diferentes respuestas de un edificio variando las condiciones de suelo sobre el que estaría cimentado y considerando el efecto de la ISE. De tal manera que se comprenda la diferencia del comportamiento dinámico de la estructura respecto al análisis convencional.

1.5. ALCANCE

En el presente estudio se analizará la respuesta sísmica de un edificio de 6 pisos y 2 sótanos de sistema muros estructurales variando las propiedades mecánicas del suelo. Se realizará el análisis para suelos S1, S2 y S3 según la norma E.030 (2018). Cabe mencionar que para el edificio se realizará un análisis estático y un análisis dinámico, donde para este último

tipo de análisis se realizará un análisis modal espectral considerando el espectro de aceleraciones de la norma peruana de diseño sismorresistente y una zona sísmica 3. Asimismo, se estudiarán tres casos con diferentes características. En el primer caso, se considerará que los sótanos se mueven con el suelo, lo cual permite considerar empotrada la base en el nivel de la superficie. En el segundo caso, se modelará toda la estructura incluyendo los sótanos y se variará la restricción del movimiento traslacional de los muros de sótano. En el tercer caso, se tendrá en cuenta la estructura en su totalidad como en el caso anterior, pero adicionalmente se considerará la interacción suelo-estructura, donde el suelo se modelará como un elemento tridimensional que será representado mediante el modelo del semiespacio elástico lineal. Todo lo mencionado, se realiza en el programa SAP2000, donde se modelarán los elementos viga, columnas y placas tipo *frame*, los muros de los sótanos serán tipo *Shell* y, finalmente, el suelo se modelará como un elemento *solid*.

1.6. METODOLOGÍA

Se realiza el estudio a fin de aportar conocimiento sobre la importancia de considerar la ISE en el análisis y diseño sísmico de edificios. Por ello, la metodología consta de las siguientes etapas:

- 1) Se recopilará información sobre conceptos básicos, modelos matemáticos y normas internacionales sobre interacción suelo estructura y avances en la aplicación de este tipo de análisis en la práctica.
- 2) Se seleccionarán normativas y parámetros para el análisis y modelado del edificio.
- 3) Se definirán los modelos estructurales a estudiar, considerando la variación del tipo de suelo en cada modelo y fijando otros parámetros necesarios para el análisis.
- 4) En el programa SAP2000, se modelará cada caso y se realizará el análisis estático y el análisis modal espectral, considerando parámetros normativos.
- 5) Del análisis realizado se obtendrán los desplazamientos, derivas y fuerzas internas para cada caso, estos resultados obtenidos serán organizados y evaluados para compararlos.
- 6) Después de las evaluaciones, se emitirán conclusiones basadas en los resultados con respecto a la influencia de la ISE en edificaciones de características determinadas y se establecerán recomendaciones para posteriores investigaciones.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

El capítulo comprende los avances de la aplicación acorde al tema de investigación, conceptos que sustentan la interacción suelo-estructura y el diseño de la presente investigación mediante planteamientos teóricos.

2.1. ANTECEDENTES

A causa de la alta actividad sísmica que caracteriza a la costa del territorio peruano, es primordial que el diseño de las construcciones cumpla con los principios del diseño sismorresistente. Por ello, la norma peruana de diseño sismorresistente propone que para la elección de un sistema estructural se incluya ciertos aspectos como garantizar una resistencia adecuada y la ductilidad de los elementos que la componen. Sin embargo, las normativas peruanas no incluyen la influencia del suelo en el comportamiento de la estructura y no considerarla parte del análisis podría generar resultados perjudiciales.

Conocer el movimiento superficial del terreno producto de un evento sísmico es importante para determinar la resistencia que se debe conferir a las cimentaciones de una edificación. Aunque estimar con precisión el movimiento sísmico de los suelos es difícil, es posible calcular algunas características típicas de este. Existen modelos empleados en normas internacionales que caracterizan la ISE, los cuales permiten representar respuestas cercanas al movimiento del suelo circundante a las cimentaciones. Asimismo, la formulación de estos está estrechamente relacionada con las propiedades del suelo y el tipo de cimentación de las estructuras.

Es conveniente presentar algunos estudios relacionados con la importancia de realizar un análisis considerando ISE. En la publicación de Pinto-Vega y Ledezma (2019), se realizó un análisis de los esfuerzos laterales sísmicos en los muros de contención de los sótanos de un edificio; y se comparó la respuesta sísmica a campo libre y los resultados a nivel de cimentación. Se puede observar que los resultados son diferentes a los obtenidos por un análisis sísmico donde las condiciones de borde se modelan totalmente rígidas a nivel de cimentación.

Asimismo, en la investigación de Rodríguez y Villavicencio (2021) se analizó el comportamiento de varios modelos para una edificación con sótanos ante solicitaciones sísmicas, los cuales se diferenciaban en las condiciones de su subestructura y las propiedades del suelo. El objetivo central fue conocer el efecto de interacción en la respuesta sísmica de un edificio de oficinas de 15 pisos con 2, 5 y 8 sótanos. De esa manera, ambos autores sostienen que conforme aumenta la profundidad de la cimentación, existe una relación directa y proporcional entre la subestructura y el suelo. También, concluyen que el desplazamiento generado por el giro en la cimentación disminuye. A su vez, observaron que, al evaluar las variantes en los tipos de suelo con menor rigidez, la interacción afecta a los resultados con mayor importancia.

2.2. CONCEPTOS BÁSICOS

Antes de abarcar a detalle las definiciones y características de los distintos modelos matemáticos de ISE y las propiedades de los suelos, es necesario comprender algunos términos importantes. En la presente sección, se describe en qué consiste la ingeniería sismorresistente y su estrecha relación con el riesgo sísmico. Además, se definirá el método por el cual se estudiará el desempeño de la estructura a modelar ante solicitaciones externas.

2.2.1. INGENIERÍA SISMORRESISTENTE

Es la rama de la ingeniería cuyo objetivo central es la construcción de estructuras que no colapsen y ante terremotos severos sean posibles restaurarlas. Además, junto al objetivo principal se precisa otros relacionados al comportamiento de dichas estructuras frente a sismos de menor intensidad y mayor frecuencia (Muñoz, 2020). Para cumplir los objetivos, interactúan diversas disciplinas: Geología, Sismología y Mecánica de Suelos; las cuales permiten una mayor comprensión del comportamiento estructural.

A través de los años, esta ingeniería ha logrado desarrollarse debido a la investigación teórica y experimental. En efecto, existen modelos que cuantifican el peligro sísmico y métodos numéricos que evalúan el comportamiento en el rango inelástico de estructuras en sismos de mayor intensidad. Si bien la probabilidad que un evento sísmico de gran magnitud suceda es escasa durante el tiempo de vida útil de una estructura, resulta más económico que dicha estructura desarrolle un nivel de daño durante un evento sísmico de gran intensidad que

diseñarlo a fin de que no presente daños en sismos de una intensidad mayor (Centro Nacional de Prevención de Desastres, 1999). De tal modo, las normativas respaldan la filosofía y principios del diseño sismorresistente, los cuales involucran prevenir pérdidas de vidas humanas, mantener los servicios básicos en funcionamiento y disminuir los daños estructurales.

2.2.2. RIESGO SÍSMICO

Se entiende como el daño que podría tener una estructura en consecuencia al peligro que la amenaza y de su propia vulnerabilidad (Muñoz, 2018). El peligro sísmico “P” se relaciona con las características sísmicas del lugar en el que se ubica la estructura, cuya evaluación puede ser realizada por métodos determinísticos o probabilísticos. En cambio, se denomina vulnerabilidad “V” a las características propias de las estructuras, que dependen de la forma en que hayan sido diseñadas. A partir de lo mencionado, el riesgo sísmico puede ser expresado de la siguiente manera:

$$R = P \times V$$

Esto indica, la independencia de dos términos y el propósito que se busca de lograr resultados de riesgo similares en construcciones de igual uso. Por tal motivo, para la estimación del riesgo sísmico se requiere responder las preguntas como dónde suceden los sismos potencialmente dañinos, qué tan frecuentes son, cuál es la distribución de los tamaños de los terremotos y qué daños se presentarán en las estructuras (Centro Nacional de Prevención de Desastres, 1999). En efecto, la vigente norma de diseño sismorresistente divide en cuatro zonas el territorio peruano según las características sísmicas y la atenuación con la distancia epicentral. Además, cada área está representada por un factor, el cual indica que existe una probabilidad de 10% donde la aceleración máxima horizontal en suelo rígido se exceda en 50 años.



Figura 1. Zonas Sísmicas del Perú.

Nota. Tomado de “Norma E.030 Diseño Sismorresistente”, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y SENCICO, 2018.

2.2.3. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Dícese de la representación del comportamiento de una estructura ante las cargas prescritas y/o solicitaciones externas. Además, los parámetros de interés que representan el desempeño del diseño estructural son los esfuerzos, deflexiones y reacciones en los apoyos debido a una condición de carga (Kassimali, 2010). Forma parte del desarrollo de proyectos de ingeniería estructural, rama que consiste en el planeamiento, diseño y construcción de estructuras de manera segura y económica.

En general, para un proyecto ingenieril se realiza el siguiente proceso: etapa de planeación, predimensionamiento de los elementos estructurales, determinación de cargas y análisis estructural. Luego, el proceso continúa con los pasos de comprobación de seguridad, servicio y revisión del diseño estructural. En particular, el análisis estructural comprende la selección de metodologías y herramientas de análisis para la determinación del comportamiento de una estructura que pueda ser lineal o no lineal; con ella, se realizan los cambios de selección necesarios para finalmente diseñar la estructura.

2.2.4. MODELO DE ANÁLISIS

Entiéndase como la idealización de una estructura real compuesta por elementos, conexiones y cargas actuantes, además de la geometría de la estructura. Con el fin de realizar el análisis estructural se generan modelos para obtener la solución a las ecuaciones diferenciales provenientes del equilibrio de partículas de una estructura, las cuales son las representaciones más pequeñas de un elemento.

Particularmente, en el análisis estructural se puede idealizar los elementos de una estructura independientemente del material y su forma como unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales (Ottazi, 2016). Un elemento bidimensional podría representar una losa, cáscara o muro; mientras que una viga, columna o armadura podría ser simbolizado como un elemento unidimensional. De manera general, la clasificación de los elementos dependerá a juicio del ingeniero encargado del dimensionamiento porque no existe un límite claro de separación.

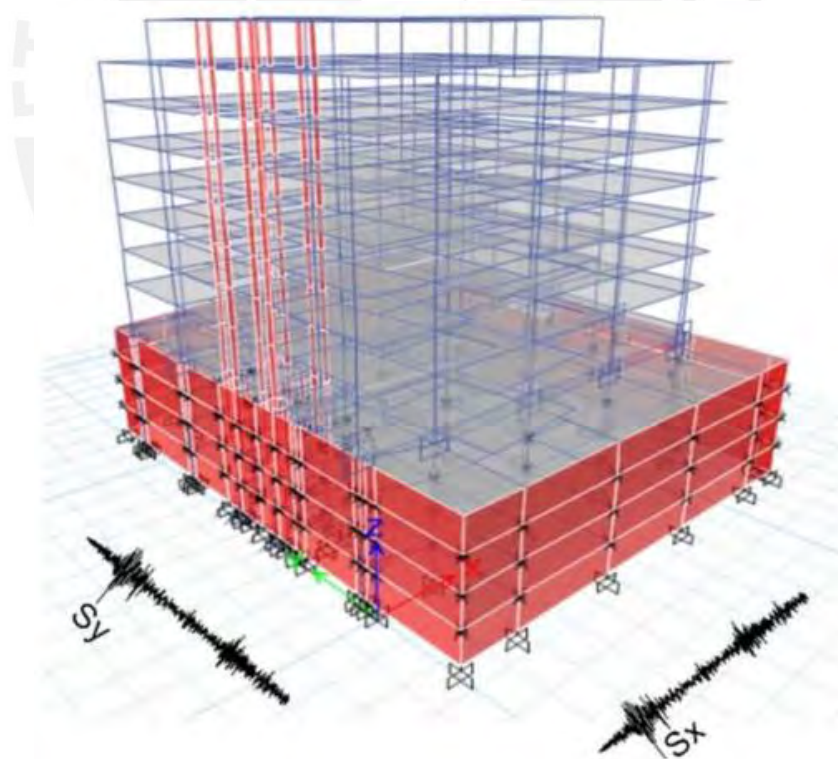


Figura 2. Modelo de un edificio de 8 niveles y 4 sótanos en el programa ETABS.

Nota. Tomado de “Comentarios a la Norma Peruana E.030 Diseño Sismorresistente”, por SENCICO, 2020.

2.3. INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

En esta sección se explicará los conceptos generales de la ISE, los tipos de interacción que existen: estática y dinámica; las componentes: interacción cinemática e interacción inercial y finalmente, se analizarán los agentes que modifican su comportamiento.

2.3.1. CONCEPTOS BÁSICOS

Según la institución Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2009) citado por el National Earthquake Hazards Reduction Program (NERPH) (2012), la respuesta de una estructura sometida a un terremoto está influenciada por la relación entre tres agentes: la estructura, la cimentación, y el suelo que está debajo y circundante a la cimentación. La interacción suelo – estructura se encarga de evaluar colectivamente la respuesta de estos sistemas ante un movimiento del suelo. En este sentido, cuando el suelo está sin la presencia de una estructura y es sometido a un movimiento, tendrá cierto comportamiento al cual se le denomina respuesta a campo libre. No obstante, la estructura presente en el suelo modifica la respuesta de este ante un movimiento, a este efecto se le denomina interacción suelo – estructura (ISE).

Debe señalarse que existen dos tipos de métodos para analizar la interacción suelo-estructura. El primer método es denominado el análisis directo, donde se evalúa en conjunto la estructura, cimentaciones y suelo, este método se realiza mediante elementos finitos ya que su análisis es complejo. El segundo método es denominado el de la subestructura, en el cual, la ISE se divide en diferentes partes y se usan resortes para modelar la rigidez y el amortiguamiento del contacto suelo-cimentación (FEMA, 2020).

En relación al tema, se conoce que el comportamiento de una estructura varía dependiendo de las características del suelo sobre el que esté cimentado, de manera general se establecerán las diferencias entre dos tipos de suelos: suelo rígido y suelo flexible. Por un lado, cuando una estructura se asienta sobre un suelo rígido, las frecuencias de la estructura no se ven afectadas y las ondas en el suelo no se ven modificadas por la presencia de esta y por tanto puede ser despreciable. Por otro lado, si la estructura está cimentada en un terreno blando, las frecuencias del sistema suelo-estructura disminuyen con respecto al caso anterior y las ondas sísmicas si se modifican debido a la presencia de la estructura, por lo tanto, se debe considerar

la ISE en el análisis (Mejia, 2017). Asimismo, se pueden diferenciar dos tipos de ISE: Interacción estática e interacción dinámica.

- En primer lugar, la interacción estática se manifiesta cuando la influencia de la estructura se da en condiciones estáticas. Se puede observar que, para esta condición, se usan coeficientes de rigidez estático, se producen grandes deformaciones y la respuesta se caracteriza por el coeficiente de rigidez estático, denominado coeficiente de balasto (Guanchez, 2021). Algunos investigadores que desarrollaron modelos matemáticos para el caso estático son: Winkler E., Pasternak P.L. y Leóntiev N.N.
- En segundo lugar, la interacción dinámica se manifiesta cuando la influencia de la estructura se da en condiciones dinámicas. Se aprecia que para esta condición se presentan coeficientes de rigidez y amortiguamiento dinámicos, las cargas son variables en el tiempo, la combinación de la rigidez dinámica y el amortiguamiento da como resultado una función de impedancia (Guanchez, 2021). Algunos de los investigadores que desarrollaron modelos matemáticos para este caso dinámico son: Barkan - Savinov, Ilichev y Sargsian.

Según la institución NERPH (2012) menciona que los efectos de ISE son categorizados según los efectos de interacción inercial, interacción cinemática y flexibilidad de suelo-cimentación. En ese sentido, Mejia (2017) señala que estos efectos modifican el comportamiento de la ISE cuando se encuentran sobre un suelo blando o tienen una base deformable.

2.3.1.1. INTERACCIÓN INERCIAL

Las fuerzas de inercia provenientes de la vibración de la estructura y su cimentación generan fuerzas cortantes basales, momento y torsión, las cuales producen desplazamientos y rotaciones en el contacto suelo-cimentación. Estas respuestas están asociadas a la flexibilidad del sistema, alargando el período fundamental de vibración y a la modificación del amortiguamiento, debido a la energía disipada mediante amortiguamiento por radiación y amortiguamiento histerético del suelo (NERPH, 2012). En síntesis, en este efecto la cimentación está sometida a dos tipos de movimientos: el movimiento de entrada en la cimentación, que puede ser visto como un movimiento aplicado a nivel de fondo de la cimentación y el movimiento debido a la respuesta inercial

de la estructura que produce las deflexiones en los cimientos (FEMA, 2020). Las modificaciones producidas por la fuerza de inercia de la estructura se refieren a la interacción inercial.

2.3.1.2. INTERACCIÓN CINEMÁTICA

Esta interacción representa la modificación que se produce en el movimiento de campo libre del suelo por el movimiento de entrada en la cimentación (FEMA, 2020). Asimismo, este movimiento produce la dispersión de las ondas sísmicas y genera una incoherencia de los movimientos del suelo (ASCE, 2017). Puesto que hay una variación del movimiento del terreno con la profundidad y existen ondas sísmicas entrantes no verticales, por lo que esta interacción es importante para estructuras con períodos largos o que tienen sótanos. No obstante, según Mejía (2017), en edificaciones robustas, con esbeltez baja y cimentaciones superficiales, muchas veces no se considera esta interacción. La condición se debe a la disminución del movimiento de frecuencias altas que produce y a la rotación generada en la cimentación. Esta rotación tiene poco efecto en el resultado de las aceleraciones y desplazamientos de la estructura.

2.3.1.3. EFECTOS DE LA FLEXIBILIDAD SUELO-CIMENTACIÓN

Este efecto se relaciona con una condición de cimentación deformable. En la cual, las deformaciones en los elementos estructurales de cimentación por flexión, axial y cortante se producen como resultado de las fuerzas aplicadas por la superestructura y el suelo (NERPH, 2012).

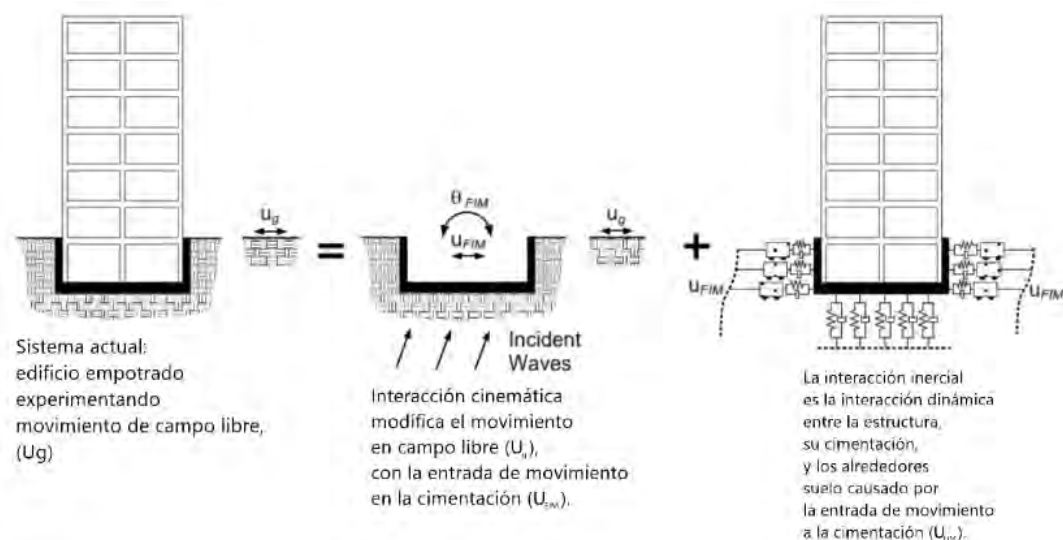


Figura 3. Representación del movimiento a campo libre del suelo y su relación con la interacción cinemática e inercial.

Nota. Tomado de FEMA, 2020.

2.3.2. MODELOS MATEMÁTICOS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

A partir de los tipos de ISE: estática y dinámica, se presentan varios modelos matemáticos que puedan representar sus características y los comportamientos del suelo y la estructura.

2.3.2.1. MODELOS MATEMÁTICOS DE INTERACCIÓN ESTÁTICA SUELO-ESTRUCTURA

En esta sección se detallan algunos modelos matemáticos estáticos planteados por los autores: Winkler, Pasternak y el modelo del semiespacio elástico.

2.3.2.1.1. MODELO DE WINKLER

En 1867, Winkler propuso por primera vez un modelo matemático donde se considera la ISE con la subestructura (León, 2011). En este modelo, el suelo está representado por un grupo infinito de resortes ubicados bajo una viga deformable. Se considera el suelo como elástico y deformable, y se modelan las cimentaciones como una viga flexible.

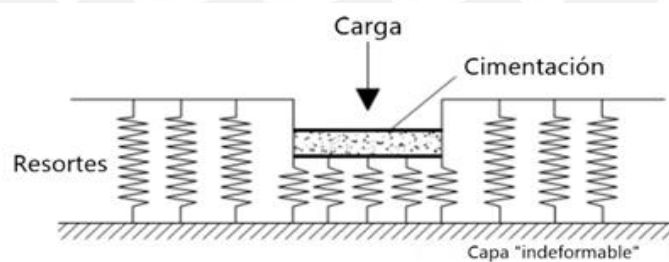


Figura 4. Modelo de Winkler.

Nota. Tomado por León, 2011.

Analíticamente, se representa mediante la siguiente expresión:

$$q = k * \delta \quad (2.1)$$

Donde:

- q : Presión de contacto

- k : Módulo de reacción del suelo o coeficiente de balasto
- d : Deformación vertical del suelo

El modelo plantea solo una componente vertical del módulo de balasto que representa un colchón de resortes en la superficie de contacto suelo – cimentación. Aunque el modelo tiene la enorme ventaja de su sencillez, se aleja considerablemente del comportamiento real del suelo (Santos, 1980). En consecuencia, se desprecia la cohesión entre partículas del suelo, suponiendo una independencia entre resortes (Mejia, 2017).

2.3.2.1.2. MODELO DE PASTERNAK P.L.

En 1954 P.L. Pasternak propone un modelo matemático para representar la ISE. Según Santos (1980) se basa en dos hipótesis, que se presentan a continuación:

1. Ante una carga se genera un asentamiento que es proporcional a la intensidad de esta.
2. El cambio en la deformación genera una fuerza cortante que es proporcional a esta.

Asimismo, se consideran los coeficientes de balasto C_1 y C_2 , que describen la deformación vertical y el trabajo del suelo circundante a la cimentación (Villarreal, 2006a).

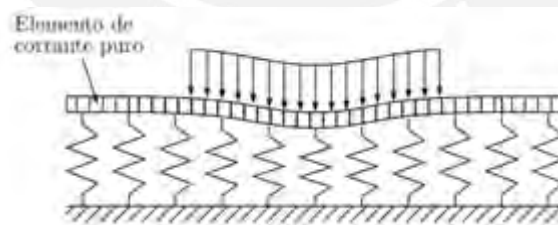


Figura 5. Modelo de Pasternak.

Nota. Tomado por Santana, 2010.

Según Santana (2010), se plantean las siguientes ecuaciones matemáticas para representar los componentes. Para las tensiones tangenciales se tiene la siguiente expresión:

$$\tau_{xz} = \mu \frac{dv(x)}{dx} \quad (2.2)$$

Donde:

μ : coeficiente de rigidez transversal

2.3.2.1.3. MODELO DEL SEMIESPACIO ELÁSTICO DEFORMABLE

En 1885, Boussinesq desarrolló un modelo matemático en el cual mediante la aplicación de una carga concentrada superficial, se incrementa el valor del esfuerzo en una masa semi-infinita de suelo. En el cual, se supuso que el semi-espacio es infinitamente grande, homogéneo, elástico, lineal e isótropo (Yepez, 2008).

En base a ello, Vlaslov y Leontiev desarrollan un modelo considerando un semiespacio elástico y la teoría de la elasticidad, cuyas características dependen del módulo de elasticidad (E_s) y el módulo de Poisson (ν_s).

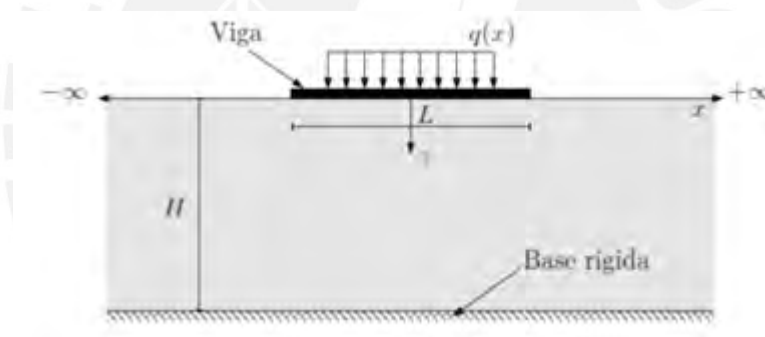


Figura 6. Modelo de Vlaslov-Leontiev.

Nota. Tomado por Santana, 2010.

De la misma forma, Genner Villareal (2006a) menciona que, en el análisis estructural considerando interacción suelo-cimentación-superestructura, el suelo se representa como un semiespacio elástico. Lo cual comprende una resolución matemática tediosa que se puede realizar mediante computadoras usando el método de elementos finitos (León, 2011).

A partir de ello, Villareal (2006a) plantea las siguientes expresiones para el cálculo de los coeficientes de Balasto horizontal y vertical, C_1 y C_2 , respectivamente. Considerando el esquema del semiespacio elástico linealmente deformable, y el módulo

de deformación E_s y el coeficiente de Poisson del suelo de fundación de varios estratos, lo cual se representa mediante las siguientes expresiones:

$$E_s = \frac{\sum (\sigma_{zrk} * h_k)}{\sum \left(\frac{\sigma_{zrk} * h_k}{E_k} \right)} \quad (2.4)$$

$$v_s = \frac{\sum (v_k * h_k)}{H_c} \quad (2.5)$$

$$C_1 = \frac{E_s}{(H_c * (1 - v_s^2))} \quad (2.6)$$

$$C_2 = \frac{E_s * H_c}{6 * (1 - v_s)} \quad (2.7)$$

Donde:

- K : cantidad de substratos
- σ_{zrk} : esfuerzo medio vertical en el substrato K
- h_k : espesor del substrato K
- E_k : módulo de deformación del substrato K
- v_k : coeficiente de Poisson del substrato K
- H_c : espesor del estrato

2.3.2.2. MODELOS MATEMÁTICOS DE INTERACCIÓN DINÁMICA SUELO-ESTRUCTURA

En esta sección se detallan algunos modelos dinámicos planteados por los autores Barkan, Savinov e Ilichev.

2.3.2.2.1. MODELO DINÁMICO D.D. BARKAN - O.A. SAVINOV

Este modelo matemático parte de la interacción entre las cimentaciones y el suelo (Abanto et al., 2020). Según Villareal (2006a), en 1948 el científico ruso D.D. Barkan determinó los coeficientes de rigidez de las cimentaciones. Estos coeficientes dependen de la compresión y desplazamiento elástico que actúan sobre una inercia y área (Meza & Valderrama, 2014). Analíticamente se expresa según las siguientes expresiones:

$$K_z = C_z * A \quad (2.8)$$

$$K_x = C_x * A \quad (2.9)$$

$$K_\varphi = C_\varphi * A \quad (2.10)$$

Donde:

- C_z, C_x y C_φ : Coeficientes de compresión elástica uniforme y no uniforme
- K : Coeficiente de desplazamiento elástico uniforme
- A : Área de la cimentación

2.3.2.2.2. MODELO DINÁMICO V.A. ILICHEV

El modelo dinámico de Ilichev fue modelado como un semiespacio para aplicarlo en sistemas ondulatorios de ISE.

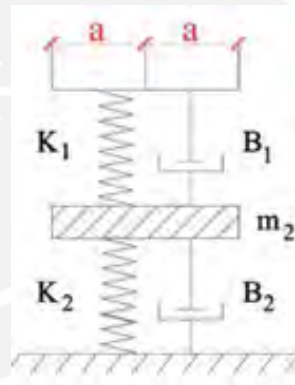


Figura 7. Modelo de V.A. Ilichev.

Nota. Tomado por Villareal, 2006a.

La parte superior del mecanismo representa a un objeto sin peso, el resorte tiene una rigidez, K_1 y el amortiguador, B_1 , en conjunto representan el comportamiento de las ondas longitudinales. Por otro lado, la parte inferior del sistema caracteriza el comportamiento dinámico de la placa frente a las ondas transversales y de Rayleigh. A su vez, la variación del módulo de deformación $E(z)$ de la base del sistema, se representa mediante la siguiente expresión:

$$E_{(z)} = E_0 \left[tg\psi \frac{z}{\alpha} + 1 \right] \quad (2.16)$$

Donde:

- E_0 : módulo de deformación del suelo en la superficie

- Z : profundidad del suelo de fundación respecto a la superficie
- ψ : ángulo de fricción interna del suelo; $\alpha=1m$

2.4. MÉTODOS PARA EVALUAR PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO

El análisis estructural dinámico de las superestructuras también requiere el conocimiento de la respuesta dinámica del suelo y de sus propiedades dinámicas (Luna & Jadi, 2000). Las principales propiedades dinámicas son la velocidad de la onda de corte (V_s), módulo de corte (G), relación de amortiguamiento (D) y relación de Poisson (ν).

Según Mejia (2017), los métodos para caracterizar las propiedades dinámicas del suelo se pueden clasificar según los siguientes criterios:

- Basados en análisis de registro de sismo (acelerogramas y sismoscopios).
- Basados en análisis de micro terremotos artificiales para la obtención de acelerogramas teóricos.
- Basados en estudios de campo y laboratorio.

A continuación, se detallarán los métodos analíticos, mediante estudios de campo y de laboratorio.

2.4.1. MÉTODOS DE CAMPO

- Refracción Sísmica: método en el que se obtienen las velocidades de onda (V_s y V_p) y el espesor de cada capa.
- Métodos de pozos cruzados o Cross Hole: Con este método solo se puede determinar la velocidad de onda de corte (V_s).
- Técnicas de fondo y de fondo de pozo o Up-hole y Down-hole: En cuanto a la primera obtienen las velocidades de onda (V_s y V_p) y la segunda solo permite medir la velocidad de onda de corte (V_s).
- El ensayo MASW o Análisis de Ondas Superficiales en Arreglo Multicanal se obtienen el perfil de velocidades de ondas de corte (V_s) hasta profundidades de 25 m a 30 m.
- El método MAM o Medición de Microtrepidaciones en Arreglos Multicanal consiste en el monitoreo de vibraciones ambientales y con ellos establece el perfil de velocidades de ondas S (V_s) del suelo hasta profundidades de 50 m a 80 m.

- Prueba de penetración de cono sísmico (SCPT): Con este método solo se determina la velocidad de onda de corte (V_s).

2.4.2. MÉTODOS DE LABORATORIO

Los métodos de laboratorio que permiten obtener la elasticidad dinámica (E_d), la razón de amortiguamiento del suelo (ξ) y módulo de rigidez al esfuerzo cortante (G) son los siguientes: triaxial cíclico, columna resonante y corte simple cíclico.

2.5. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Este método sustituye la solución continua de un sistema de ecuaciones diferenciales por una solución discreta o discontinua, que resulta ser una respuesta más aproximada. Consiste en dividir el cuerpo en una malla de elementos pequeños, para los cuales se supone una solución constante para cada uno de ellos. De esta manera, dicho método en vez de buscar aproximaciones que sean directamente para toda la región, divide la región en partes más pequeñas y la aproximación se realiza sobre cada elemento. Por ejemplo, aunque la variable sea no lineal en toda la región, puede ser una aproximación válida suponer que la variable será lineal sobre cada elemento (Ottosen & Petterson, 1922). Cabe mencionar que la exactitud del análisis por elementos finitos depende del número de divisiones y la forma de estas.

Al conjunto de elementos finitos se le denomina malla y están interconectados por puntos denominados nodos. En dichos nodos se definen los grados de libertad que representan los movimientos, fuerzas o momentos que se transfieren entre elementos (Cortez & Sotomayor, 2007). Según el tipo de estructura se pueden considerar que los elementos serán unidimensionales (vigas), bidimensionales (placas) o tridimensionales (sólidos). En este sentido, se utilizará un tipo de elemento dependiendo del tipo de objeto que será modelado y el tipo de análisis a realizar. Para la presente investigación se modelará el suelo como un elemento sólido, para ello se debe considerar que, para el caso de elementos sólidos se considera que en los nodos hay tres grados de libertad; además, estos pueden estar situados no sólo en los vértices sino en los lados e interior del elemento.

Según el método directo propuesto por el NERPH (2012), se representa al suelo como un continuo junto a la fundación y los elementos estructurales, uniendo fronteras entre los contornos de la malla del suelo y la interfaz en los bordes de la cimentación. En este método

se representan las propiedades del suelo como lineales y equivalentes en elementos finitos (FEMA, 2021).

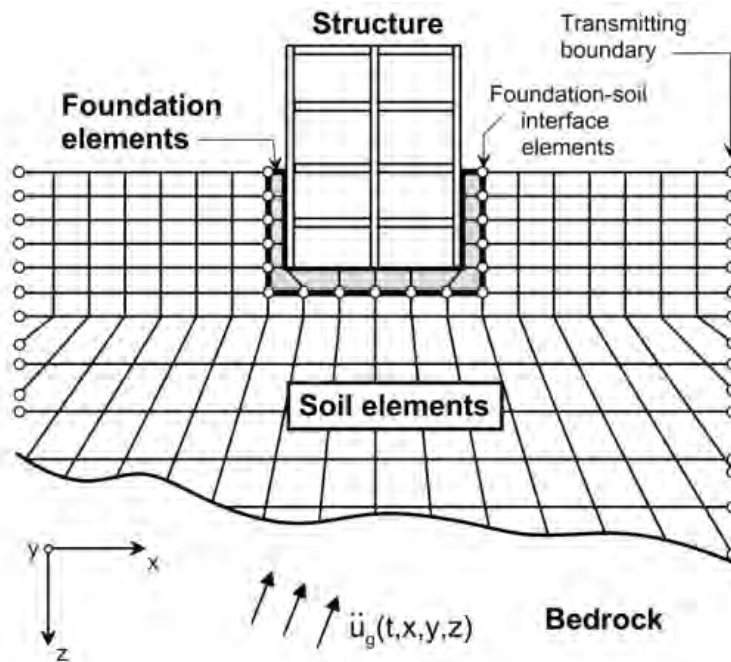


Figura 8. Representación de un análisis directo de la interacción suelo-estructura mediante un modelo por elementos finitos.

Nota. Tomado de NERPH (2012).

El suelo será representado mediante el modelo del semiespacio elástico, utilizando propiedades del suelo tales como el módulo de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson (ν), con las cuales puede ser resueltos mediante las teorías de la elasticidad.

CAPÍTULO III. MARCO NORMATIVO

En esta sección, se exponen los alcances del estudio en las normativas nacionales: E.020 y E.030; y de igual manera, se muestran las consideraciones de algunas normas o estándares internacionales para el análisis estructural de edificaciones.

3.1. NORMA E.020

Establece cargas mínimas en condiciones de servicio, de modo que las edificaciones y sus elementos resistan según su uso previsto. Estas cargas actúan bajo combinaciones establecidas y se complementan con los parámetros de diseño. En ese sentido, definen dos tipos de carga: muerta y viva.

Por un lado, se entiende por carga muerta a aquella que se encuentra permanente en la edificación o con una ligera variación en el tiempo; tales como el peso propio de los materiales, equipos y tabiques. Por otro lado, la carga viva es una fuerza o acción transitoria como el peso de las personas, materiales, equipos, entre otros.

Para realizar el análisis estructural del edificio de oficinas a modelar en la presente investigación, se consideró las siguientes cargas:

Tabla 1. Pesos unitarios y cargas repartidas por carga muerta según norma E.020

Materiales	Peso kN/m³ (Kgf/m³)
Concreto Armado	24.0 (2400)
Uso	Cargas repartidas kPa (kgf/m²)
Tabiquería móvil	1.0 kPa (100kgf/m ²)

Tabla 2. Cargas vivas según norma E.020

Tipo	Ocupación o uso	Cargas repartidas kPa (kgf/m²)
Del piso	Oficina (excepto salas de archivo y computación, no incluye posible tabiquería móvil)	2.5 (250)
Del techo	Techo con inclinación hasta de 3° con respecto a la horizontal	1,0 (100)

3.2. NORMA E.030

Fija los requerimientos mínimos para el diseño en edificios nuevos; también, establece condiciones para que estructuras existentes sean reforzadas y aquellas que presenten daños antes fuerzas sísmicas puedan ser reparadas. La norma expone diferentes procedimientos de análisis sísmico, algunos de ellos son el análisis estático y el análisis dinámico modal espectral.

3.2.1. ANÁLISIS ESTÁTICO

Se entiende como el método que representa sollicitaciones sísmicas como fuerzas que actúan en el centro de masas de cada diafragma en la edificación. Cabe resaltar, que su aplicación depende de la sismicidad del lugar, tipos de uso, características del suelo y regularidad de la estructura.

Para la fuerza cortante basal aplicada en la estructura, se tiene la siguiente expresión bajo ciertos parámetros:

$$V = \frac{Z*U*C*S}{R} * P \quad (3.1)$$

Donde:

- Z: Zona sísmica
- U: Categoría de edificación y factor de uso
- C: Factor de amplificación sísmica
- S: Tipo de suelo
- R: Coeficiente de reducción de fuerzas
- P: Peso del edificio
- TP, TL: Períodos (parámetros del sitio)

Tabla 3. Factores de Zonificación “Z”

FACTORES DE ZONIFICACIÓN “Z”	
ZONA	Z
4	0,45
3	0,35
2	0,25
1	1,00

Nota. Tomado de “Norma E.030 Diseño Sismorresistente”, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y SENCICO, 2018.

Tabla 4. Factores de suelo “S”

ZONA/SUELO	S0	S1	S2	S3
Z4	0,80	1,00	1,05	1,10
Z3	0,80	1,00	1,15	1,20
Z2	0,80	1,00	1,20	1,40
Z1	0,80	1,00	1,60	2,00

Nota. Tomado de “Norma E.030 Diseño Sismorresistente”, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y SENCICO, 2018.

Tabla 5. Períodos TP y TL

	TIPO DE SUELO			
	S0	S1	S2	S3
TP (s)	0,3	0,4	0,6	1,0
TL (s)	3,0	2,5	2,0	1,6

Nota. Tomado de “Norma E.030 Diseño Sismorresistente”, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y SENCICO, 2018.

Además, para el factor de amplificación dinámica (C), se tiene las siguientes funciones según las características del sitio y al período (T):

- $T < TP$ $C = 2.5$ (3.2)

- $TP < T < TL$ $C = 2.5\left(\frac{Tp}{T}\right)$ (3.3)

- $T > TL$ $C = 2.5\left(\frac{Tp*TL}{T^2}\right)$ (3.4)

Conviene señalar que T es el período fundamental de vibración, que depende de parámetros estipulados por la norma según características del edificio. Antes bien, mediante el programa SAP2000, se obtendrá el período de la edificación.

3.2.2. ANÁLISIS DINÁMICO

Cuando la base de las estructuras está sujeta a cargas o desplazamientos, actúan dinámicamente; como consecuencia se desarrollan cargas o desplazamientos opuestas a este movimiento impuesto ante tales cargas o desplazamientos. En ese sentido, el método de análisis dinámico utiliza respuestas espectrales correspondientes a las diversas formas que adopta un modelo estructural con varias masas puntuales en vibración libre en instantes diferentes. Esto hace referencia a un modo de vibración, el cual está constituido por una forma y período de vibración de una estructura. Asimismo, mediante los resultados de la combinación espectral, cualquier estructura puede ser diseñada.

En particular, la norma indica que para cada dirección horizontal se utiliza un espectro inelástico de pseudo-aceleraciones expresado con la siguiente función:

$$S_d = \frac{Z * U * C * S}{R} * g \quad (3.5)$$

3.3. NORMAS INTERNACIONALES

De acuerdo al contenido de las normas nacionales, se corrobora que no se incluye modelos de ISE. Por ello, se muestran las siguientes normas internacionales que consideran la interacción en su contenido.

3.3.1. FEMA 2091

FEMA 2091 es la reciente guía práctica para interacción suelo-estructura por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos. Se basa en el enfoque del ASCE/SEI 7-16 y comprende ciertos aspectos que la norma NIST GCR 12-917-21 (2012) no abarca en su contenido. Esta última es un documento referencial para diseño sísmico que aplica los principios y procedimientos fundamentales de ISE en edificios.

Efectivamente, la guía menciona algunas situaciones donde el ISE podría generar una diferencia significativa en la respuesta y comportamiento sísmico de edificios. De esa manera, propone cuatro casos: edificios de gran planta, cimentaciones profundas, largos períodos y flexibilidad del suelo. Para el primer caso, conforme se incrementan las dimensiones de la planta, se reducen las fuerzas de diseño debido a los efectos de interacción cinemática de la cimentación. Asimismo, para el segundo caso, la guía asegura que mientras se incremente la

profundidad del empotramiento de la cimentación, mayor será la reducción en la respuesta espectral de período corto debido a la disminución de amplitudes del movimiento del suelo con la profundidad.

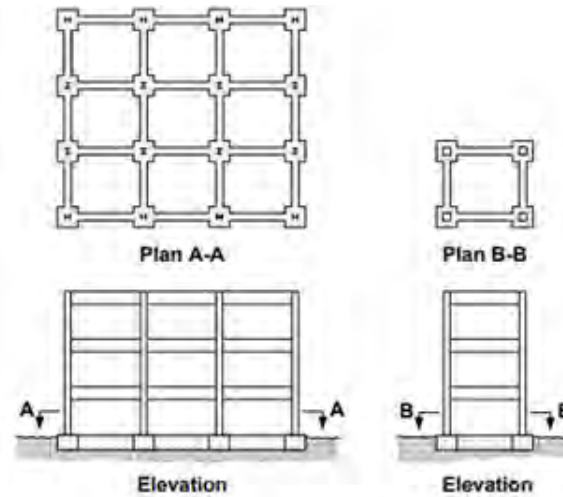


Figura 9. Representación de un edificio de grande planta (izquierda) y un edificio de igual altura con menor tamaño de planta (derecha).

Tomado de “A Practical Guide to Soil-Structure Interaction”, por FEMA P-2021, 2020.

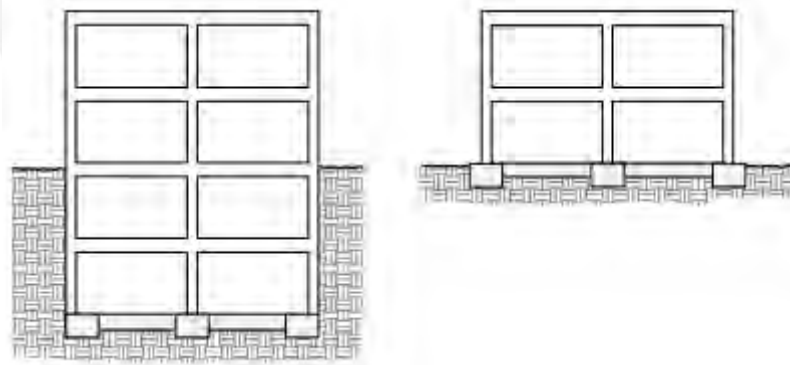


Figura 10. Representación de un edificio con sótanos(izquierda) y un edificio sin cimentación profunda (derecha).

Tomado de “A Practical Guide to Soil-Structure Interaction”, por FEMA P-2021, 2020.

De forma similar, la vigente norma americana proporciona una regla de relación entre la estructura y la rigidez del suelo que se correlaciona con la probabilidad de que los efectos inerciales de la ISE sean significativos. Se muestra la siguiente ecuación planteada bajo tres parámetros:

Si $h' / (vT) > 0.1$, entonces los efectos inerciales de la ISE serán importantes.

- h' = altura del edificio
- v_s = velocidad de onda de baja deformación sobre la profundidad
- T = período fundamental de la estructura

3.3.2. NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO POR SISMO (2017) - MÉXICO

La presente norma mexicana se aplica para diseño sísmico de edificios urbanos, en la cual toma como consideración los efectos de ISE. Se propone entonces considerar este efecto en los espectros para diseño sísmico y en la modelación de sistema estructural.

Asimismo, se menciona que para los tipos de suelos clasificados como Zona II (suelo arenoso y limo-arenoso con presencia de arcilla lacustre) y Zona III (suelo arcilloso altamente compresible con presencia de capas de arena con limo o arcilla), el espectro a campo libre podría no representar correctamente las sollicitaciones sísmicas.

En primer lugar, se presentan las siguientes expresiones que se deben cumplir para despreciar la interacción cinemática en caso de estructuras subterráneas, sin pilotes ni pilas:

$$\frac{T_s}{\tau_v} < 12 \quad (3.6)$$

$$\frac{D}{r} < 0.5 \quad (3.7)$$

Además,

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (3.8)$$

$$V_s = \frac{4H_s}{T_s} \quad (3.9)$$

Donde

- T_s : Período más largo del terreno
- T_v : Tiempo de llegada de las ondas sísmicas a través de la profundidad de cimentación
- D : Profundidad de cimentación
- A : Área de la cimentación

- Vs: Velocidad efectiva de ondas cortantes
- Hs: Profundidad de la segunda capa rígida

En el caso que no se cumplan estas ecuaciones, se procede a modificar el espectro según lo señalado en la sección A.1 de la norma.

En segundo lugar, se señala que puede despreciarse la interacción inercial si se cumple la siguiente condición:

$$\frac{T_e.H_s}{T_s.H_e} > 2.5 \quad (3.10)$$

Donde:

- T_e : Período fundamental de la estructura con cimentación rígida
- H_e : Altura efectiva que se tomará como 0.7 de la altura total, con excepción de estructuras de un solo nivel, en que será igual a la altura total.
- T_s : Período fundamental del sitio

Si la interacción inercial no se puede despreciar, entonces pueden variar las fuerzas de diseño correspondientes a un modelo de base rígida y modificar los desplazamientos laterales. En ese sentido se deben tener en cuenta las siguientes expresiones para cada caso:

Cortante basal modificado:

Análisis estático: Para este caso se tiene las siguientes expresiones:

$$\underline{V_o} = a'.W_o - (a' - \underline{a}')W_e \quad (3.11)$$

Además,

$$a' = \frac{a}{RQ'} \quad (3.12)$$

$$\underline{a}' = \frac{\underline{a}}{RQ'} \quad (3.13)$$

Donde:

- W_o : Peso total de la estructura

- W_e : Peso efectivo de la estructura, igual a $0.7W_o$
- a : Ordenada espectral elástica para el período T_e y el amortiguamiento ξ_e (5 %) de la estructura con cimentación rígida
- \tilde{a} : Ordenada espectral elástica para el período T_e 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 $\tilde{\xi}'_e$: Período y Amortiguamiento efectivos modificados

Desplazamiento lateral modificado

Análisis estático: Para esta condición se tiene las siguientes expresiones:

$$\underline{X}_i = \frac{v_o}{v_o} \left[X_i + \frac{v_o}{k_h} + (h_i + D)^2 \right] \frac{M_o}{k_r} \quad (3.14)$$

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 la cimentación
- k_h y k_r : Rigidez de traslación y de rotación de la cimentación, respectivamente.

Análisis dinámico modal:

$$\underline{X}_{i1} = \frac{v_{o1}}{v_{o1}} \left[X_{i1} + \frac{v_{o1}}{k_h} + (h_i + D) \frac{M_{o1}}{K_R} \right] \quad (3.15)$$

Donde:

- v_{o1} y M_{o1} : Fuerza constante y momento de volteo en la base, respectivamente.
- \tilde{X}_{i1} : Desplazamiento del i -ésimo nivel a la altura h_i sobre cimiento.

Determinación de períodos y amortiguamiento efectivo:

- Período efectivo del sistema compuesto por el suelo y la estructura en la dirección de análisis:

$$\underline{T_e} = \sqrt{T_e^2 + T_h^2 + T_r^2} \quad (3.16)$$

- Período natural de la estructura asociado con una traslación horizontal de cuerpo rígido (T_h):

$$T_h = \frac{2\pi}{\sqrt{g}} \sqrt{\frac{W_e}{K_h}} \quad (3.17)$$

- Período natural de la estructura asociado con una rotación de cuerpo rígido (T_r):

$$T_r = \frac{2\pi}{\sqrt{g}} \sqrt{\frac{W_e(H_e+D)^2}{K_r}} \quad (3.18)$$

- Amortiguamiento efectivo del sistema compuesto por el suelo y la estructura elástico:

$$\underline{\xi_e} = \xi_e \left(\frac{T_e}{\underline{T_e}}\right)^2 + \frac{\xi_h}{1+2\xi_h^2} \left(\frac{T_e}{\underline{T_e}}\right)^2 + \frac{\xi_r}{1+2\xi_r^2} \left(\frac{T_e}{\underline{T_e}}\right)^2 \quad (3.19)$$

Además,

$$\xi_h = \frac{\pi C_h}{T_e K_h} \quad (3.20)$$

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
- ξ_r : Coeficiente de amortiguamiento del suelo en el modo de rotación
- C_h y C_r : Fuerza y momento necesarios para producir velocidades unitarias de cimentación en traslación horizontal y rotación, respectivamente.

CAPÍTULO IV. ESTUDIO DE CASOS

En líneas generales, el desarrollo del presente estudio inicia con la fijación de parámetros y criterios, continúa con la construcción y evaluación de casos de estudio y finaliza con la generalización de modelos. Para ello, se proponen tres casos de estudio provenientes de un modelo estructural. Se analizará cada caso por medio de los métodos que establece la norma E.030: análisis estático y análisis dinámico modal espectral. Estos nos permitirán comparar los desplazamientos, desplazamientos relativos de entrepiso (derivadas) y cortante basal ocasionadas por eventos sísmicos.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

Para el estudio, se tiene un edificio de oficinas que presenta 6 niveles y 2 sótanos. Los sótanos y pisos típicos tienen una altura de 3.2m. La estructura está compuesta por los siguientes elementos estructurales: losas macizas, vigas, columnas y muros estructurales. El detalle de la estructuración del edificio de los pisos típicos y sótanos se pueden visualizar en el Anexo A.

Asimismo, se consideró las siguientes dimensiones de cargas según los niveles del edificio:

Pisos +1 al +6:

- Losa maciza: Carga muerta de 0.48 ton/m²
- Tabiquería: Carga muerta de 0.1 ton/m²
- Piso terminado: Carga muerta de 0.10 ton/m²
- Sobrecarga: Carga viva de 0.25 ton/m²

Azotea:

- Carga muerta: 0.48 ton/m²
- Carga viva: 0.1 ton/m²

Sótanos:

- Losa maciza: Carga muerta de 0.48 ton/m²

- Piso terminado: Carga muerta de 0.10 ton/m²
- Sobrecarga: Carga viva de 0.25ton/m²

4.2. PARAMETROS DE SITIO

Para fines de investigación, de acuerdo a la norma E.030, se les asigna los siguientes factores que serán utilizados para los análisis:

- Zonificación: Se fija una zona sísmica 3 (Z3), la cual es característica de algunos territorios que comprende la costa, la sierra y en una minoría, la selva. Además, le corresponde un valor de $Z=0.35$.
- Categoría de edificación: Dado a que se evalúa un edificio de oficinas, de tipo común, se cataloga como categoría “C” y se le atribuye un factor de uso $U=1$.
- Sistema Estructural: El proyecto es una estructura conformada por muros estructurales; por ello, se le asigna un coeficiente de reducción sísmica de $R_o=6$.

4.3. CONDICIONES INICIALES DEL MODELADO

Se utiliza el software SAP2000 para el modelado estructural, que permite el análisis y representación de los elementos estructurales. Para el modelado del edificio, se tuvo las siguientes consideraciones:

- Se definió el material de concreto armado $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$.
- Las columnas y vigas son representadas como elementos de tipo “frame”.
- Los muros estructurales son elementos que soportan cargas horizontales y verticales, se modelaron como elementos “frame” debido al método numérico a emplear en la investigación: elementos finitos. Esto con el fin de proponer otro tipo de representación debido a la demanda computacional que involucrará el análisis del suelo representado por elementos finitos. Dada la hipótesis de Navier (secciones planas), suposición que sustenta la modelación de los muros como elementos unidimensionales, no considera el caso de una falla producida por cortante.
- A su vez, los muros van acompañados de brazos rígidos, los cuales representan la conexión viga-muro y se emplean desde el eje de los muros hasta el borde con las vigas. En las características de los brazos rígidos, se utiliza un módulo de

elasticidad los suficientemente grande para así representar su comportamiento rígido y es de igual dimensión transversal que las vigas cercanas a ellos.

- Las losas son modeladas como superficies del tipo “shell thin” debido a que soporta cargas aplicadas con fuerzas internas dentro y fuera de su plano. Estas losas distribuyen sus cargas de forma trapezoidal a las vigas por el método del sobre. Se le asignaron las cargas como tipo “Area uniform loads to frames”, las cuales se distribuyen en las dos direcciones locales del área.
- Se asignaron diafragmas rígidos en cada piso, a fin de idealizarlos de manera continua y cumpla con la condición de no tener aberturas mayores al 50%.

4.4. CONDICIONES PARA EL MODELADO DEL SUELO

Para la elaboración del análisis sísmico se considerarán estratos de suelo homogéneo cohesivo de diferentes características que se establecen según la norma E.030:

- S1: Arena muy densa
- S2: Arena media
- S3: Arena media a fina

Las características para cada tipo de suelo, que se mencionan en la normativa se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6. Clasificación de los perfiles del suelo

CLASIFICACIÓN DE LOS PERFILES DEL SUELO		
Perfil	Vs	Su
S1	500 m/s a 1500 m/s	>100kPa (1 kg/cm ²)
S2	180 m/s a 500 m/s	Entre 50kPa (0.5 kg/cm ²) y 100kPa (1 kg/cm ²)
S3	< 180 m/s	Entre 25kPa (0.25 kg/cm ²) y 50kPa (0.5 kg/cm ²)

Nota. Tomado de “Norma E.030 Diseño Sismorresistente”, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y SENCICO, 2018.

Para definir el comportamiento del suelo, antes se debe conocer algunas propiedades. En primer lugar, se debe hallar el coeficiente de balasto del suelo, el cual es usado en el modelo matemático de Winkler para representar el efecto de la ISE. El módulo es representado por la

división entre la presión de contacto hacia el suelo (ρ) y la deformación vertical que se produce a partir de esta presión (δ). La expresión se puede apreciar a continuación:

$$K = \frac{\rho}{\delta} \quad (4.1)$$

La ecuación 4.1 es utilizada especialmente para correlacionar resultados experimentales. Terzagui aproximó el resultado de asentamiento ocurrido en las zapatas a partir de un ensayo de una placa de carga con dimensión de 0.30mx0.30m. Así, se admite el valor de K_{30} como módulo de balasto correspondiente a las magnitudes de la placa de carga sobre el terreno. Cabe resaltar, que este tipo de ensayo es costoso porque requiere de grandes pesos para aportar la inercia suficiente. Por ello, en proyectos de edificación no es frecuente realizarlos, pero sí en obras civiles (canales, presas, carreteras, etc). De ese modo, para la determinación de algunos parámetros se suelen utilizar la Tabla 7, que se muestra a continuación:

Tabla 7. Módulo de balasto según Terzagui.

Suelo	K30 por Terzagui (kg/cm3)
Arcilla blanda (S3)	3.0
Arcilla media (S2)	6.0
Arcilla compacta (S1)	20

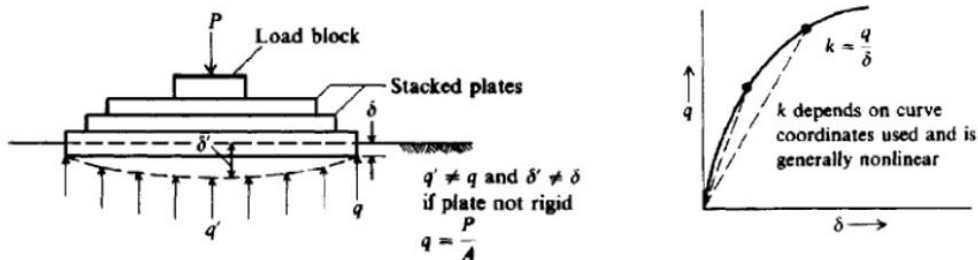


Figura 11. Representación del coeficiente de balasto (izquierda) y curva Presión del suelo vs. Deformación vertical (derecha).

Tomado de “Foundation analysis and design”, por Bowles, 1996.

Asimismo, se sabe que la deformación axial de un cuerpo se puede calcular mediante la ley de Hooke y viene dada por la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{P*L}{E*A} \quad (4.2)$$

Donde:

- D: Deformación axial
- P: Fuerza axial aplicada
- L: longitud de la muestra
- E: módulo de elasticidad
- A: área

De la ecuación 4.1 es posible hallar la fuerza axial para el ensayo de plato de carga, empleando K30 para una placa cuadrada de 30 cm y que según Crespo (2004), en el ensayo se somete a la muestra de suelo a una presión tal que se produzca una deformación de 0.127 cm (0.05”), mediante lo cual se calcula la fuerza axial.

$$P = k_{30} * d * A \quad (4.3)$$

De la ecuación 4.2 se calcula el módulo de elasticidad, teniendo en cuenta la fuerza axial calculada con la ecuación 4.1., considerando una porción de suelo de área unitaria, un alto de 6 metros y una deformación axial de 0.127 cm.

Posteriormente, se establecen los coeficientes de Poisson relacionados con el módulo de elasticidad mediante los valores que muestra la siguiente figura.

Tabla 17.6 Parámetros elásticos para varios tipos de suelo

Tipo de suelo	Módulo de elasticidad, E_s (MN/m ²)	Coefficiente de Poisson, μ_s
Arena suelta	10–25	0.20–0.40
Arena semi-densa	15–30	0.25–0.40
Arena densa	35–55	0.30–0.45
Arena limosa	10–20	0.20–0.40
Arena y grava	70–170	0.15–0.35
Arcilla blanda	4–20	
Arcilla media	20–40	0.20–0.50
Arcilla dura	40–100	

Figura 12. Valores de Coeficiente de Poisson

Nota. Tomado de Braja, 2013

Además, se elaboró la siguiente tabla para mostrar los parámetros considerados y los valores obtenidos a partir de las expresiones dadas líneas arriba.

Tabla 8. Valores de Módulo de elasticidad y módulo de Poisson

Tipo de suelo	K30 (kg/cm3)	k30 (ton/m3)	Carga Axial - P (ton)	E(ton/m2)	Coefficiente de Poisson
Arcilla blanda	3	3000	0.3429	1620	0.25
Arcilla media	6	6000	0.6858	3240	0.35
Arcilla compacta	20	20000	2.286	10800	0.45

Asimismo, en capítulos anteriores se definió el módulo de corte, mediante la siguiente expresión:

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (4.4)$$

Tabla 9. Valores de módulo de corte.

Suelo	E (ton/m2)	Módulo de Poisson	Módulo de corte (G)
Arcilla blanda (S3)	1620	0.25	648
Arcilla media (S2)	3240	0.35	1200
Arcilla compacta (S1)	10800	0.45	3725

Por otro lado, en la norma E.050 se menciona que la profundidad “p” mínima a alcanzar para un punto de investigación es 1.5 B, siendo B el ancho de la cimentación para el caso de edificaciones con cimentación superficial. Para el presente análisis, se considera que el edificio será cimentado sobre una platea y por tanto, se tomará B como el valor del ancho de la planta, con lo cual, se representará el estrato de suelo sobre el cual estará apoyada la estructura. Por lo tanto, se considera 1.5 B para la profundidad y para el ancho del estrato, una distancia horizontal B desde la cara de los muros del sótano. Asimismo, en la base y los lados laterales de la masa de suelo se restringe los desplazamientos horizontales y verticales. Tomando todas estas consideraciones, se genera una malla de sólidos cuadriláteros de tres dimensiones cuyo tamaño permita la unión mediante nodos con la estructura.

4.5. OTRAS CONSIDERACIONES DEL MODELADO

Una consideración en el análisis estructural que es importante evaluar es la secuencia de construcción, visto que en la realidad la construcción de un edificio se da por etapas y en el análisis convencional se realiza asignando la carga en un solo instante. Según Panigrahi et. al (2019) la carga aplicada asumida en el método convencional será inadecuada según la práctica de construcción real. Por ello, el pórtico debe analizarse en cada etapa de la construcción considerando el efecto de la variación de las cargas en cada etapa.

En consecuencia, se puede obtener momentos flectores erróneos en las vigas de los pisos superiores, dado por la fuerza axial sobre las columnas que producen un asentamiento diferencial en estas. Esto genera errores en los diagramas de momentos flectores obtenidos, sobre todo en las vigas de pisos superiores, cabe mencionar que en un edificio de poca altura los asentamientos producidos sobre las columnas no serán significativo, ya que la carga axial que se aplicará sobre ellos no será importante y no genera asentamientos significativos.

Algunos investigadores han realizado estudios sobre la comparación de los resultados considerando la condición de análisis convencional y considerando el proceso constructivo, en las cuales se ha podido determinar que, si se trata de edificios de mayor altura, considerar esta condición dentro del análisis resulta importante. En la investigación realizada por Gaidhankar et. al (2021), en la cual realiza una comparación en un edificio de 15 pisos en el cual se determina que los valores de fuerza cortante y momento de flexión son marcadamente diferentes en un análisis convencional y que en un análisis considerando la secuencia de construcción. Además, se concluye que en edificios de gran altura es necesario incluir esta condición en el análisis y diseño debido a la diferencia considerable en los resultados.

Asimismo, en la investigación realizada Panigrahi et. al (2019) donde ha realizado el análisis de edificios con más de 18 pisos, también ha determinado un incremento de hasta 25% en los momentos, fuerzas de corte y deflexiones de los elementos, y se concluye la importancia de incluir esta condición en el análisis de edificio de gran altura. En base a los casos presentados, debido a que el edificio estudiado en esta investigación tiene 6 pisos, se ha considerado realizar el análisis convencional para la obtención de resultados.

4.6. MODELO 01: BASE EMPOTRADA SIN SÓTANOS

El primer modelo en evaluación está constituido por la estructura de 6 niveles con una base empotrada a nivel de superficie. Los sótanos, la cimentación y el terreno conforman un sistema que no permite desplazamientos relativos, rotación ni movimientos en los puntos de contacto del terreno con la subestructura debido a la rigidez del conjunto formado.

Se utiliza el software SAP2000 para el modelado estructural, que permite el análisis y representación del sistema estructural. Como se mencionó anteriormente, las columnas, vigas y muros estructurales son representadas como elementos de tipo “frame”; sin embargo, en estas últimas se consideran brazos rígidos para una mejor representación del sistema. A su vez, las losas fueron modeladas como elementos de superficie del tipo “shell thin”. Para el modelo estructural 1, se definirá también los parámetros sísmicos según los 3 tipos de suelo.

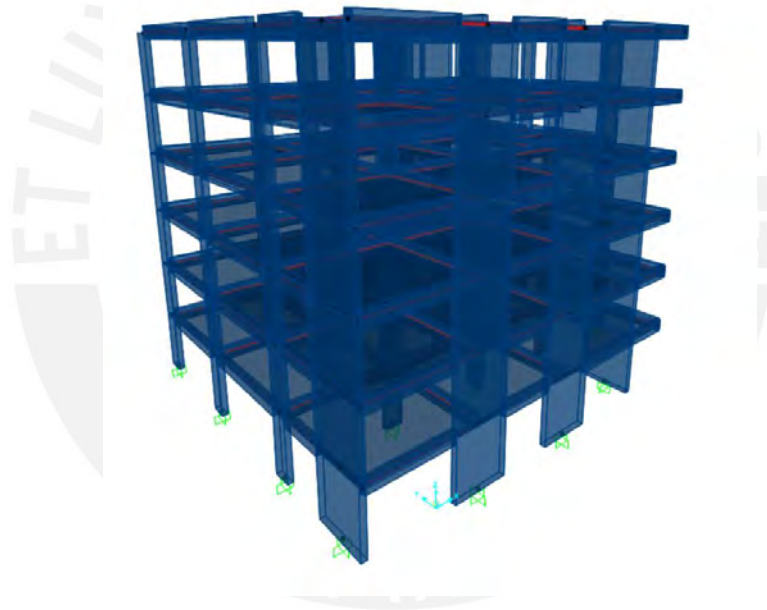


Figura 13. Modelo estructural con base empotrada y sin sótanos. Fuente: propia.

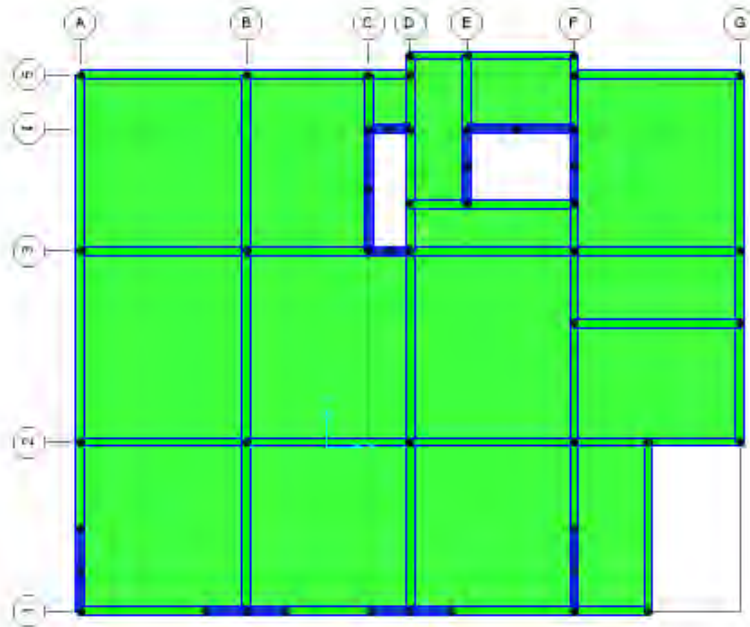


Figura 14. Vista en planta del 4to piso del Modelo 01. Fuente: propia.

Esta simple idealización permite comparar los resultados con los de los otros modelos, pues no involucra un análisis de ISE. Cabe resaltar que, para los demás casos, se presentan las mismas características del edificio, pero se consideran ciertas modificaciones en el modelamiento de su base.

4.7. MODELOS 02

El segundo modelo consta de la representación del edificio con los 6 niveles superiores y 2 sótanos que lo caracterizan en sus condiciones iniciales. Asimismo, para su diseño se incluyen los mismos elementos verticales y horizontales utilizados para el primer caso. En cuanto al modelado de los muros de los sótanos se consideran elementos “shell thin” y se proponen dos escenarios: 02A y 02B. De igual manera, para ambos modelos se definirán los parámetros sísmicos según los 3 tipos de suelo.

4.7.1. MODELO 02A: CON SÓTANOS, SIN CONFINAMIENTO

Por un lado, el modelo 2A consiste en el empotramiento de la cimentación de la estructura al suelo. Esta idealización simboliza que la rigidez del suelo, debajo de la cimentación, es nula. En este caso, no se consideran arriostramiento en los muros de los sótanos.

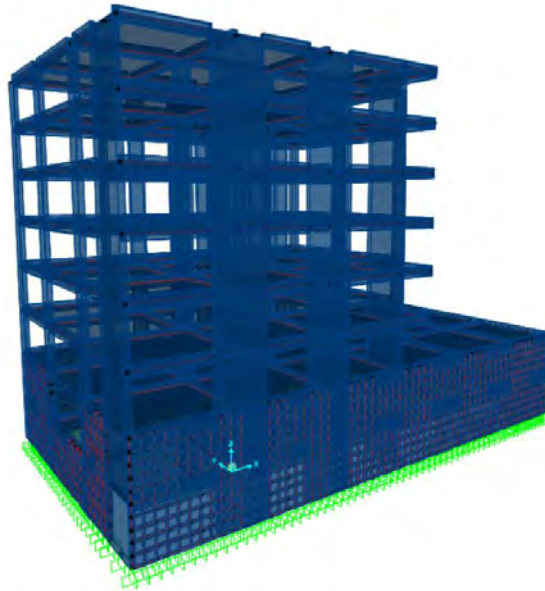


Figura 15. Modelo estructural 2A con sótanos y sin confinamiento en las paredes de los sótanos. Fuente: propia.

4.7.2. MODELO 02B: CON SÓTANOS, CON CONFINAMIENTO

Por otro lado, el modelo 2B comprende la misma configuración del modelo 2A más la colocación de restricciones laterales alrededor de los muros pertenecientes a los sótanos; lo cual, representa al confinamiento que da el suelo a estos elementos en la realidad. En efecto, se asume una alta rigidez del suelo que confina la estructura y restringe desplazamientos y rotaciones en los elementos exteriores de los sótanos.

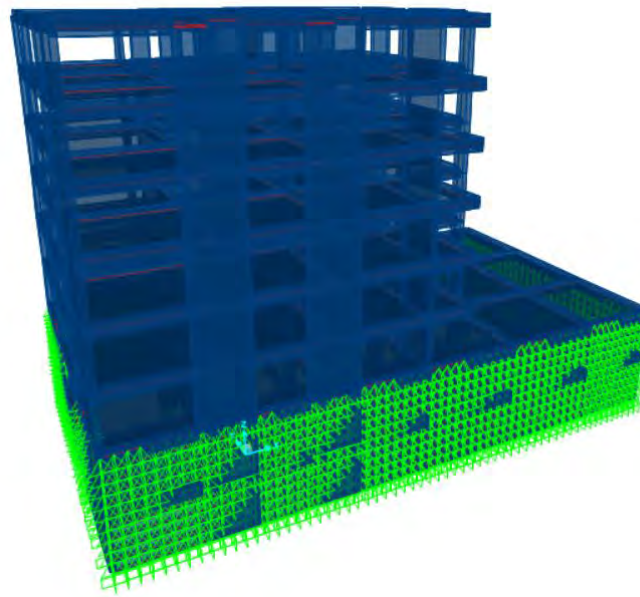


Figura 16. Modelo estructural 3 con sótanos y con confinamiento en los muros de los sótanos. Fuente: propia.

4.8. MODELO 03: CON ISE

En el tercer modelo es donde se incluye la ISE. Para lo cual, la estructura es modelada como en los casos anteriores, con la diferencia que este modelo, tiene cómo apoyo al suelo representado con un elemento SOLID con las propiedades de módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson, según lo mostrado en la Tabla 6 del presente capítulo. Asimismo, todo el contorno del suelo es restringido mediante restricciones laterales, tanto en la base como en las caras laterales.

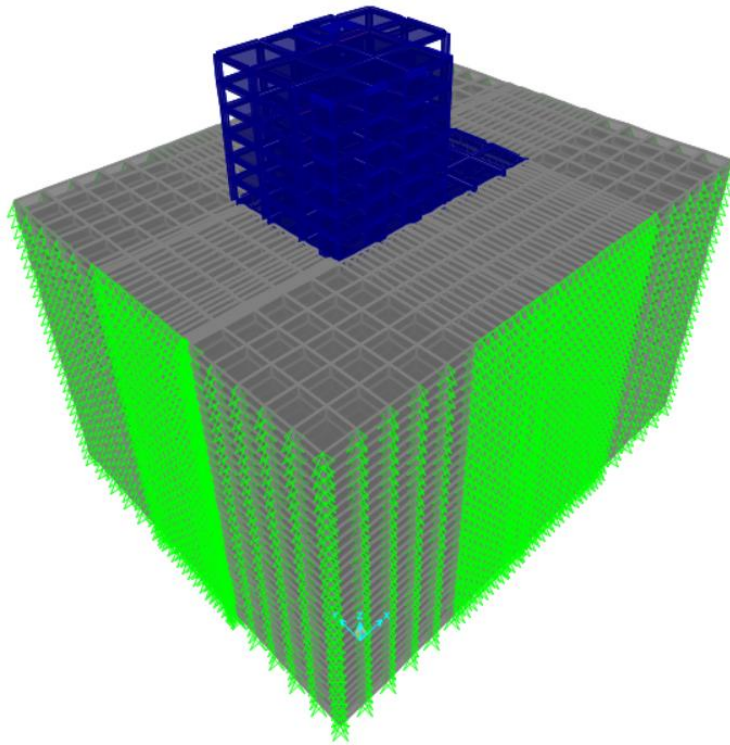


Figura 17. Modelo estructural 3 con sótanos y modelado del suelo. Fuente: propia.

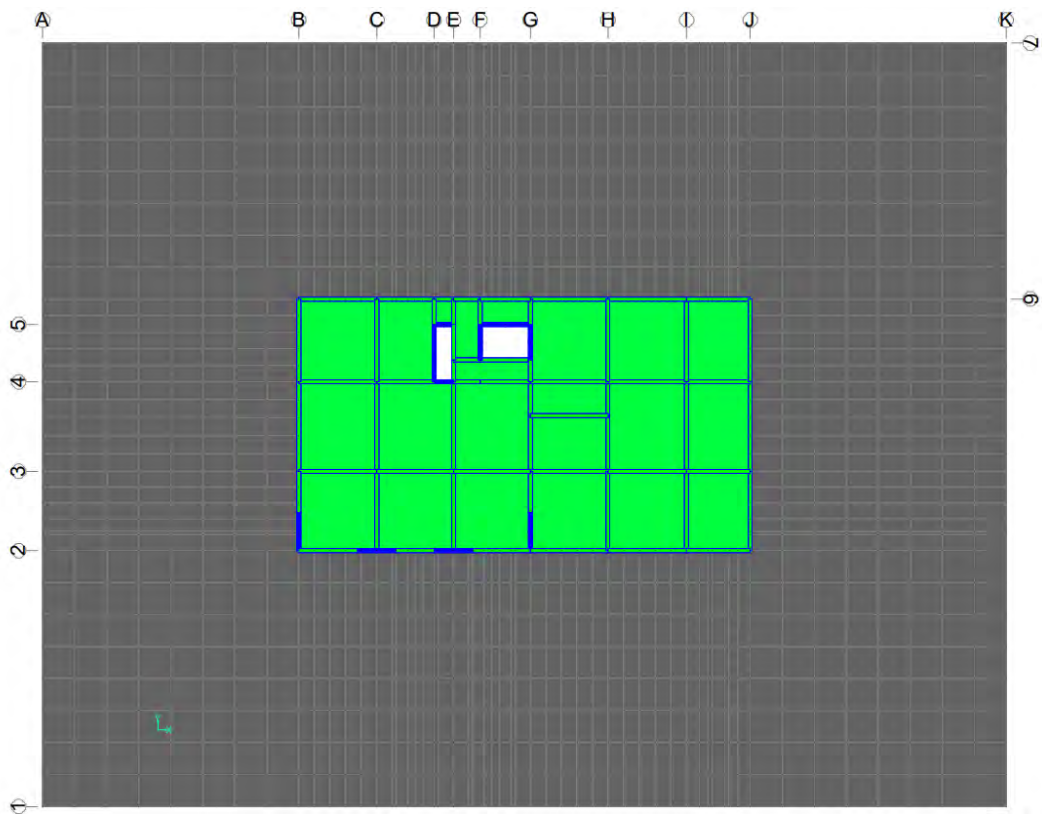


Figura 18. Vista en planta de sótano 1 del Modelo estructural 3. Fuente: propia.

Asimismo, como se mencionó en secciones anteriores, se emplearon elementos sólidos con dimensiones tales que puedan concordar con los nodos de la estructura y así representarla como un modelo de elementos finitos. Por último, se definirán en el programa los parámetros según el tipo de suelo mostrados en la Tabla 7 a fin de analizar su comportamiento variando los tipos de suelo establecidos.

CAPÍTULO V. RESULTADOS

A fin de verificar la estructuración del edificio bajo las exigencias de la norma E.030, en esta sección se muestra los resultados del análisis estático de la estructura. Asimismo, los casos de estudio bajo los parámetros sísmicos establecidos en la sección anterior son evaluados considerando la variación de los 3 tipos de suelo.

Antes cabe señalar, que el edificio está conformado por un sistema estructural de muros de concreto armado y no presenta irregularidades en altura y planta. Se presentan las Tablas 10, 11 y 12 que indican los parámetros sísmicos y resultados de los cálculos para diferentes condiciones de suelo en las direcciones X y Y.

Tabla 10. Parámetros sísmicos Z3 y S1

MODELO 01 - Z3S1			
ANÁLISIS ESTÁTICO XX		ANÁLISIS ESTÁTICO YY	
Número de pisos:	6	Número de pisos:	6
Z=	0.35	Z=	0.35
U=	1.00	U=	1.00
S=	1.00	S=	1.00
Tp=	0.40	Tp=	0.40
Tl=	2.50	Tl=	2.50
T (seg)=	0.44	T (seg)=	0.43
C=	2.27	C=	2.33
k=	1.00	k=	1.00
R=	6.00	R=	6.00
C/R	0.38	C/R	0.39
ZUCS/R	0.133	ZUCS/R	0.136
PESO TOTAL (ton)	3424.52	PESO TOTAL (ton)	3424.52
V (ton)	454.01	V (ton)	464.57

Tabla 11. Parámetros sísmicos Z3 y S2

MODELO 01 - Z3S2			
ANALISIS ESTATICO XX		ANALISIS ESTATICO YY	
Número de pisos:	6	Número de pisos:	6
Z=	0.35	Z=	0.35
U=	1.00	U=	1.00
S=	1.15	S=	1.15
Tp=	0.60	Tp=	0.60
Tl=	2.00	Tl=	2.00
T (seg)=	0.44	T (seg)=	0.43
C=	2.50	C=	2.50
k=	1.00	k=	1.00
R=	6.00	R=	6.00
C/R	0.42	C/R	0.42
ZUCS/R	0.168	ZUCS/R	0.168
PESO TOTAL (ton)	3424.52	PESO TOTAL (ton)	3424.52
V (ton)	574.32	V (ton)	574.32

Tabla 12. Parámetros sísmicos Z3 y S3

MODELO 01 - Z3S3			
ANALISIS ESTATICO XX		ANALISIS ESTATICO YY	
Número de pisos:	6	Número de pisos:	6
Z=	0.35	Z=	0.35
U=	1.00	U=	1.00
S=	1.20	S=	1.20
Tp=	1.00	Tp=	1.00
Tl=	1.60	Tl=	1.60
T (seg)=	0.44	T (seg)=	0.43
C=	2.50	C=	2.50
k=	1.00	k=	1.00
R=	6.00	R=	6.00
C/R	0.42	C/R	0.42
ZUCS/R	0.175	ZUCS/R	0.175
PESO TOTAL (ton)	3424.52	PESO TOTAL (ton)	3424.52
V (ton)	599.29	V (ton)	599.29

En las Tablas 13 y 14, se muestran los valores de derivas de entrepiso correspondientes al análisis modal espectral según el espectro de diseño de la norma E.030. Asimismo, se muestran que las derivas de entrepiso inelásticas son menores a 7% en las direcciones de sismo X y Y; por tanto, cumplen los requisitos de rigidez de la norma.

Tabla 13. Resultados para Sismo en XX - Dirección en XX para Z3S1

Piso	Altura (m)	Despl. Absoluto Elástico (mm)	Despl. Absoluto Inelástico (mm)	Despl. Entrepiso inelástico (mm)	Deriva inelástica (‰)	Norma E.030
1	3.20	0.79	3.57	3.57	1.11	Sí cumple
2	6.40	1.86	8.38	4.81	1.50	Sí cumple
3	9.60	3.02	13.61	5.23	1.64	Sí cumple
4	12.80	4.22	18.98	5.38	1.68	Sí cumple
5	16.00	5.27	23.78	4.80	1.50	Sí cumple
6	19.20	6.15	27.76	3.98	1.24	Sí cumple

Tabla 14. Resultados para Sismo en YY - Dirección en YY para Z3S1.

Piso	Altura (m)	Despl. Absoluto Elástico (mm)	Despl. Absoluto Inelástico (mm)	Despl. Entrepiso inelástico (mm)	Deriva inelástica (m/m)	Norma E.030
1	3.20	0.83	3.75	3.75	1.17	Sí cumple
2	6.40	2.14	9.61	5.86	1.83	Sí cumple
3	9.60	3.70	16.67	7.05	2.20	Sí cumple
4	12.80	5.35	24.09	7.42	2.32	Sí cumple
5	16.00	6.96	31.30	7.22	2.25	Sí cumple
6	19.20	8.44	37.96	6.66	2.08	Sí cumple

Como parte de un análisis preliminar de irregularidades, se realizaron las verificaciones en altura y en planta. Por ello, en las Tablas 15, 16, 17, 18 y 19, se muestran la comprobación de irregularidad de rigidez lateral, de masa o peso y por torsión.

Tabla 15. Irregularidad de rigidez lateral en la dirección XX

Piso	V Total XX (ton)	V Relativo XX (ton)	Desplazamiento Entrepiso (mm)	Rigidez lateral (ton/m)	0.7 del piso superior	Cumple con Norma E030
1	388.91	21.48	3.57	6022.29	5929.83	Sí cumple
2	367.44	40.74	4.81	8471.18	8298.60	Sí cumple
3	326.70	62.05	5.23	11855.14	10131.65	Sí cumple
4	264.65	77.80	5.38	14473.79	14453.34	Sí cumple
5	186.85	99.11	4.80	20647.63	15447.92	Sí cumple
6	87.74	87.74	3.98	22068.46	0.00	Sí cumple

Tabla 16. Irregularidad de rigidez lateral en la dirección YY

Piso	V Total YY (ton)	V Relativo YY (ton)	Desplazamiento Entrepiso (mm)	Rigidez lateral (ton/m)	0.7 del piso superior	Cumple con Norma E030
1	397.69	21.96	3.75	5849.76	4976.92	Sí cumple
2	375.73	41.66	5.86	7109.88	6389.79	Sí cumple
3	334.07	64.38	7.05	9128.27	7414.90	Sí cumple
4	269.69	78.62	7.42	10592.71	9832.41	Sí cumple
5	191.07	101.34	7.22	14046.31	9437.47	Sí cumple
6	89.72	89.72	6.66	13482.10	0.00	Sí cumple

Se observa que en ningún caso la rigidez de entrepiso del piso inferior es menor que el 70% de la rigidez del piso superior inmediato. Por lo cual, se determina que no hay irregularidad de rigidez lateral.

Tabla 17. Irregularidad de masa o peso

Piso	P (ton)	P relativo (ton)	Cumple con Norma E030
1	3424.51	600.53	Sí cumple
2	2823.98	591.23	Sí cumple
3	2232.75	591.23	Sí cumple
4	1641.52	591.23	Sí cumple
5	1050.28	591.23	Sí cumple
6	459.05	459.05	Sí cumple

Se verifica que, en ningún caso la masa de un piso es 1.5 veces la masa de un piso adyacente. Por lo cual se determina que no existe irregularidad de masa o peso.

Tabla 18. Irregularidad por torsión en la dirección XX

Piso	D _{máx} (mm)	D _{mín} (mm)	D prom (mm)	h(m)	D _{máx} /h (‰)	1.3 D _{prom} /h (‰)	$\frac{\Delta_{i\max}}{h_i} > 1.3 \frac{\Delta_{PRDM}}{h_i}$	$\frac{\Delta_{i\max}}{h_i} > 0.5 \left(\frac{\Delta}{h}\right)$ permisible
1	0.79	0.88	0,84	3.50	0.226	0.310	Sí cumple	Sí cumple
2	1.86	2.02	1.94	3.20	0.581	0.788	Sí cumple	Sí cumple
3	3.02	3.28	3.15	3.20	0.944	1.280	Sí cumple	Sí cumple
4	4.22	4.53	4.38	3.20	1.319	1.777	Sí cumple	Sí cumple
5	5.27	5.66	5.47	3.20	1.647	2.220	Sí cumple	Sí cumple
6	6.15	6.61	6.38	3.20	1.922	2.592	Sí cumple	Sí cumple

Tabla 19. Irregularidad por torsión en la dirección YY

Piso	D _{máx} (mm)	D _{mín} (mm)	D prom (mm)	h(m)	D _{máx} /h (‰)	1.3 D _{prom} /h (‰)	$\frac{\Delta_{máx}}{h_i} > 1.3 \frac{\Delta_{PROM}}{h_i}$	$\frac{\Delta_{máx}}{h_i} > 0.5 \left(\frac{\Delta}{h}\right)$ permisible
1	0.83	0.98	0.91	3.50	0.237	0.336	Sí cumple	Sí cumple
2	2.14	2.49	2.32	3.20	0.669	0.940	Sí cumple	Sí cumple
3	3.70	4.31	4.01	3.20	1.156	1.627	Sí cumple	Sí cumple
4	5.35	6.22	5.79	3.20	1.672	2.350	Sí cumple	Sí cumple
5	6.96	8.08	7.52	3.20	2.175	3.055	Sí cumple	Sí cumple
6	8.44	9.79	9.12	3.20	2.638	3.703	Sí cumple	Sí cumple

Se puede comprobar que en ambas direcciones la razón entre el D_{máx} y D_{promedio} no supera a 1.3 y, además, que la deriva no es mayor al 50 % de la deriva permisible. Por lo tanto, se determina que no hay irregularidad por torsión.

De la misma manera, se elaboró la siguiente tabla para comprobar que el sistema de muros estructurales asumido inicialmente sea el correcto mediante los porcentajes de fuerzas cortantes en la base del edificio compuesta por muros de corte y columnas.

Tabla 20. Verificación de un sistema de muros

Elemento	V Total XX (ton)	V Total YY (ton)	% XX	% YY
Total	388.91	397.69	-	-
Columnas	49.18	52.44	12.64%	13.19%
Placas	339.73	345.24	87.35%	86.81%

Caso	V Total XX (ton)	V Total YY (ton)
Estático	298.22	302.67
Dinámico	388.91	397.69
Factor de escala	1.17	1.18

Se determina que el sistema estructural del edificio es de **muros estructurales**, ya que la fuerza cortante tomada por los muros es mayor al 80% en ambas direcciones.

5.1. RESULTADOS DE ANÁLISIS ESTÁTICO PARA LOS CASOS DE ESTUDIO

En esta sección, se presenta para cada caso de estudio y tipo de suelo, los resultados de análisis estático, así como las masas participativas considerando los modos tales que llegue al 90% de la masa total. También se realizará la comparación entre las cortantes del análisis estático y dinámico.

Se elaboró la siguiente tabla, que muestra los porcentajes de masa participativa y los periodos de vibración más importantes del modelo 2A.

Tabla 21. Participación modal del modelo 02A

MODO	T (seg.)	UX	UY
1	0.656	3.68%	59.39%
2	0.550	59.52%	3.93%
3	0.461	0.40%	0.02%
4	0.250	11.73%	14.37%
5	0.229	0.82%	3.30%
8	0.165	0.39%	0.02%
30	0.066	4.43%	0.0001%
33	0.065	0.13%	0.002%
38	0.062	0.02%	3.30%
56	0.045	0.28%	0.03%
60	0.043	2.10%	0.0001%
63	0.042	0.57%	0.03%
68	0.039	0.0025%	3.71%
75	0.032	2.36%	0.00%
77	0.030	0.02%	4.26%
80	0.027	3.08%	0.01%
83	0.026	0.62%	0.03%
87	0.025	0.85%	0.03%
		91.01%	92.42%

De la Tabla 21, se puede comentar lo siguiente:

- Se observa que el modo fundamental de traslación en el eje Y-Y, no obstante, la diferencia con el eje X-X no es importante, sin embargo, esto indicaría que existe una mayor rigidez en la dirección de este último eje.
- El periodo fundamental para el modelo 2A de la estructura es de 0.656 seg.

Tabla 22. Coeficiente sísmico, períodos y cortante estática y dinámica del modelo 2A para sismo en XX con suelos S1, S2 y S3

ANALISIS ESTATICO XX					
MODELO 02A - Z3S1		MODELO 02A - Z3S2		MODELO 02A - Z3S3	
Z=	0.35	Z=	0.35	Z=	0.35
U=	1	U=	1	U=	1
S=	1	S=	1.15	S=	1.2
Tp=	0.4	Tp=	0.6	Tp=	1
Tl=	2.5	Tl=	2	Tl=	1.6
Hn(m)=	19.5	Hn(m)=	19.5	Hn(m)=	19.5
Ct=	35	Ct=	35	Ct=	35
T (seg)=	0.55	T (seg)=	0.55	T (seg)=	0.55
C=	1.82	C=	2.50	C=	2.50
k=	1.03	k=	1.03	k=	1.03
R=	6	R=	6	R=	6
C/R	0.30	C/R	0.417	C/R	0.417
Peso (ton)	3425.84	Peso (ton)	3425.84	Peso (ton)	3425.84
Coef. Sísmico	0.11	Coef. Sísmico	0.168	Coef. Sísmico	0.175
V (ton)	363.35	V (ton)	574.54	V (ton)	599.52

0.9 VEST XX (ton)	327.01	0.9 VEST XX (ton)	517.09	0.9 VEST XX (ton)	539.57
VDIN XX (ton)	393.94	VDIN XX (ton)	435.37	VDIN XX (ton)	472.04
Factor de escala	1.00	Factor de escala	1.19	Factor de escala	1.14

En la Tabla 22, se puede apreciar que los coeficientes sísmicos, cortantes estáticas y dinámicas aumentan con el tipo de suelo, obteniéndose mayores cortantes en el suelo S3 que viene a ser el suelo menos rígido. Cabe mencionar que, para este caso de estudio se obtiene las mayores cortantes, debido a la condición de borde de los sótanos produce que se tenga mayores valores de fuerzas.

Tabla 23. Coeficiente sísmico, períodos y cortante estática y dinámica del modelo 2A para sismo en YY con suelos S1, S2 y S3

ANALISIS ESTATICO YY					
MODELO 02A - Z3S1		MODELO 02A - Z3S2		MODELO 02A - Z3S3	
Z=	0.35	Z=	0.35	Z=	0.35
U=	1	U=	1	U=	1
S=	1	S=	1.15	S=	1.2
Tp=	0.4	Tp=	0.6	Tp=	1
Tl=	2.5	Tl=	2	Tl=	1.6
Hn(m)=	19.5	Hn(m)=	19.5	Hn(m)=	19.5
Ct=	35	Ct=	35	Ct=	35
T (seg)=	0.66	T (seg)=	0.66	T (seg)=	0.66

C=	1.52	C=	2.29	C=	2.50
k=	1.08	k=	1.08	k=	1.08
R=	6	R=	6	R=	6
C/R=	0.25	C/R=	0.38	C/R=	0.42
Peso (ton)=	3425.84	Peso (ton)=	3425.84	Peso (ton)=	3425.84
Coef. Sísmico	0.089	Coef. Sísmico	0.153	Coef. Sísmico	0.175
V (ton)=	304.63	V (ton)=	525.50	V (ton)=	599.52

0.9 VEST YY (ton)	274.17	0.9 VEST YY (ton)	472.95	0.9 VEST YY (ton)	539.57
VDIN YY (ton)	389.29	VDIN YY (ton)	434.20	VDIN YY (ton)	463.07
Factor de escala	1.00	Factor de escala	1.09	Factor de escala	1.17

En la Tabla 23, se puede observar que para el modelo 2A en sismo para dirección Y, se presentan los mismos parámetros que en el caso anterior y con la misma tendencia en función del tipo de suelo. No obstante, se puede observar menores valores de fuerza cortante debido a que en este eje se tiene una menor rigidez.

Además, en la Tabla 24, se muestran los porcentajes de masa participativa y los períodos de vibración más importantes del modelo 2B para todos los tipos de suelo.

Tabla 24. Participación modal del modelo 2B

MODO	T (seg.)	UX	UY
1	0.484	35.12%	38.33%
2	0.472	40.84%	35.85%
3	0.413	1.54%	1.25%
4	0.128	13.97%	0.01%
5	0.121	0.24%	7.46%
6	0.119	0.002%	3.00%
7	0.117	0.01%	5.06%
8	0.112	0.02%	0.46%
		91.75%	91.41%

De la Tabla 24, se puede comentar lo siguiente:

- Se puede observar que el modo de fundamental de traslación en el eje Y-Y, no obstante, la diferencia con el eje X-X no es importante, sin embargo, esto indicaría que existe una mayor rigidez en la dirección de este último eje.
- El período fundamental para el modelo 2B de la estructura es de 0.484 seg.

Tabla 25. Coeficiente sísmico, periodos y cortante estática y dinámica del modelo 2B para sismo en XX con suelos S1, S2 y S3

ANÁLISIS ESTÁTICO XX					
MODELO 02B - Z3S1		MODELO 02B - Z3S2		MODELO 02B - Z3S3	
Z=	0.35	Z=	0.35	Z=	0.35
U=	1	U=	1	U=	1
S=	1	S=	1.15	S=	1.2
Tp=	0.4	Tp=	0.6	Tp=	1
Tl=	2.5	Tl=	2	Tl=	1.6
Hn(m)=	19.5	Hn(m)=	19.5	Hn(m)=	19.5
Ct=	35	Ct=	35	Ct=	35
T (seg)=	0.47	T (seg)=	0.47	T (seg)=	0.47
C=	2.12	C=	2.50	C=	2.50
k=	1.00	k=	1.00	k=	1.00
R=	6	R=	6	R=	6
C/R	0.353	C/R	0.417	C/R	0.417
Peso (ton)	3425.84	Peso (ton)	3425.84	Peso (ton)	3425.84
Coef. Sísmico	0.124	Coef. Sísmico	0.168	Coef. Sísmico	0.175
V (ton)	423.39	V (ton)	574.54	V (ton)	599.52

0.9 VEST XX (ton)	381.05	0.9 VEST XX (ton)	517.09	0.9 VEST XX (ton)	539.57
VDIN XX (ton)	346.87	VDIN XX (ton)	423.26	VDIN XX (ton)	451.66
Factor de escala	1.10	Factor de escala	1.22	Factor de escala	1.20

En la Tabla 25, se presentan los coeficientes sísmicos para cada tipo de suelo y con el período fundamental se calcula la cortante basal estática. Asimismo, se puede observar que para el modelo 2B con sismo en dirección X, los coeficientes sísmicos, cortantes estáticas y dinámicas aumentan con el tipo de suelo, obteniéndose mayores cortantes en el suelo S3 que viene a ser el suelo menor rigidez. También se puede observar que este caso de estudio se tiene las menores cortantes en comparación al modelo 2A y 3.

Tabla 26. Coeficiente sísmico, periodos y cortante estática y dinámica del modelo 2B para sismo en YY con suelos S1, S2 y S3

ANÁLISIS ESTÁTICO YY					
MODELO 02B - Z3S1		MODELO 02B - Z3S2		MODELO 02B - Z3S3	
Z=	0.35	Z=	0.35	Z=	0.35
U=	1	U=	1	U=	1
S=	1	S=	1.15	S=	1.2
Tp=	0.4	Tp=	0.6	Tp=	1
Tl=	2.5	Tl=	2	Tl=	1.6

Hn(m)=	19.5	Hn(m)=	19.5	Hn(m)=	19.5
Ct=	35	Ct=	35	Ct=	35
T (seg)=	0.48	T (seg)=	0.48	T (seg)=	0.48
C=	2.07	C=	2.50	C=	2.50
k=	1.00	k=	1.00	k=	1.00
R=	6	R=	6	R=	6
C/R	0.34	C/R	0.42	C/R	0.42
Peso (ton)	3425.84	Peso (ton)	3425.84	Peso (ton)	3425.84
Coef. Sísmico	0.121	Coef. Sísmico	0.168	Coef. Sísmico	0.175
V (ton)	412.89	V (ton)	574.54	V (ton)	599.52

0.9 VEST YY (ton)	371.60	0.9 VEST YY (ton)	517.09	0.9 VEST YY (ton)	539.57
VDIN YY (ton)	353.96	VDIN YY (ton)	428.64	VDIN YY (ton)	453.32
Factor de escala	1.05	Factor de escala	1.21	Factor de escala	1.19

En la Tabla 26, al igual que los casos anteriores, se presentan los mismos parámetros sísmicos, los cuales tienen la misma tendencia en función del tipo de suelo. También se cumple que las cortantes en este eje son menores.

En la Tabla 27, se muestran los porcentajes de masa participativa y los periodos de vibración más importantes del modelo 3.

Tabla 27. Participación modal del modelo 03

MODO	T (seg.)	UX	UY
1	0.569	32.42%	39.15%
2	0.542	41.23%	33.21%
3	0.440	2.53%	0.98%
4	0.365	12.31%	0.02%
5	0.125	0.13%	7.46%
6	0.117	0.00%	3.00%
7	0.114	0.02%	5.06%
8	0.108	0.03%	0.46%
11	0.095	0.13%	0.03%
16	0.074	0.26%	0.13%
28	0.051	3.25%	0.025
		92.31%	91.98%

De la Tabla 27, se puede comentar lo siguiente:

- Se puede observar el mismo comportamiento de los modos de participación que en los casos anteriores.
- El período fundamental para el modelo 2B de la estructura es de 0.569 seg.

Tabla 28. Coeficiente sísmico, períodos y cortante estática y dinámica del modelo 03 para sismo en XX con suelos S1, S2 y S3

ANALISIS ESTATICO XX					
MODELO 03 - Z3S1		MODELO 03 - Z3S2		MODELO 03 - Z3S3	
Z=	0.35	Z=	0.35	Z=	0.35
U=	1	U=	1	U=	1
S=	1	S=	1.15	S=	1.2
Tp=	0.4	Tp=	0.6	Tp=	1
Tl=	2.5	Tl=	2	Tl=	1.6
Hn(m)=	19.5	Hn(m)=	19.5	Hn(m)=	19.5
Ct=	35	Ct=	35	Ct=	35
T (seg)=	0.54	T (seg)=	0.54	T (seg)=	0.54
C=	1.85	C=	2.50	C=	2.50
k=	1.02	k=	1.02	k=	1.02
R=	6	R=	6	R=	6
C/R	0.308	C/R	0.417	C/R	0.417
Peso (ton)	3425.84	Peso (ton)	3425.84	Peso (ton)	3425.84
Coef. Sísmico	0.108	Coef. Sísmico	0.168	Coef. Sísmico	0.175
V (ton)	368.71	V (ton)	574.54	V (ton)	599.52

0.9 VEST XX (ton)	331.84	0.9 VEST XX (ton)	517.09	0.9 VEST XX (ton)	539.57
VDIN XX (ton)	371.11	VDIN XX (ton)	430.20	VDIN XX (ton)	457.16
Factor de escala	1.00	Factor de escala	1.20	Factor de escala	1.18

En la Tabla 28, al igual que los casos anteriores, se presentan los coeficientes sísmicos para cada tipo de suelo y con el período fundamental se calcula la cortante basal estática para el modelo 03, donde las cortantes varían de igual manera en función al tipo de suelo. Cabe mencionar que los valores de cortantes para este caso se encuentran entre las de los modelos 2A y 2B.

Tabla 29. Coeficiente sísmico, períodos y cortante estática y dinámica del modelo 03 para sismo en YY con suelos S1, S2 y S3

ANALISIS ESTATICO YY					
MODELO 03 - Z3S1		MODELO 03 - Z3S2		MODELO 03 - Z3S3	
Z=	0.35	Z=	0.35	Z=	0.35
U=	1	U=	1	U=	1
S=	1	S=	1.15	S=	1.2
Tp=	0.4	Tp=	0.6	Tp=	1
Tl=	2.5	Tl=	2	Tl=	1.6
Hn(m)=	19.5	Hn(m)=	19.5	Hn(m)=	19.5
Ct=	35	Ct=	35	Ct=	35
T (seg)=	0.57	T (seg)=	0.57	T (seg)=	0.57

C=	1.76	C=	2.50	C=	2.50
k=	1.03	k=	1.03	k=	1.03
R=	6	R=	6	R=	6
C/R	0.29	C/R	0.42	C/R	0.42
Peso (ton)	3425.84	Peso (ton)	3425.84	Peso (ton)	3425.84
Coef. Sísmico	0.103	Coef. Sísmico	0.168	Coef. Sísmico	0.175
V (ton)	351.21	V (ton)	574.54	V (ton)	599.52

0.9 VEST YY (ton)	316.09	0.9 VEST YY (ton)	517.09	0.9 VEST YY (ton)	539.57
VDIN YY (ton)	379.36	VDIN YY (ton)	431.61	VDIN YY (ton)	458.20
Factor de escala	1.00	Factor de escala	1.20	Factor de escala	1.18

En la Tabla 29, se obtiene la misma tendencia que los casos anteriores para dirección de sismo Y, tanto para la dirección del sismo como para el tipo de suelo.

5.2. RESULTADOS DE ANÁLISIS DINÁMICO PARA LOS CASOS DE ESTUDIO

Se realizó el análisis sísmico para cada caso de estudio considerando espectros de respuesta de acuerdo a los coeficientes sísmicos. Así, se obtuvieron para cada uno los valores de períodos, cortantes, derivas y desplazamiento que se mostrarán en la presente sección.

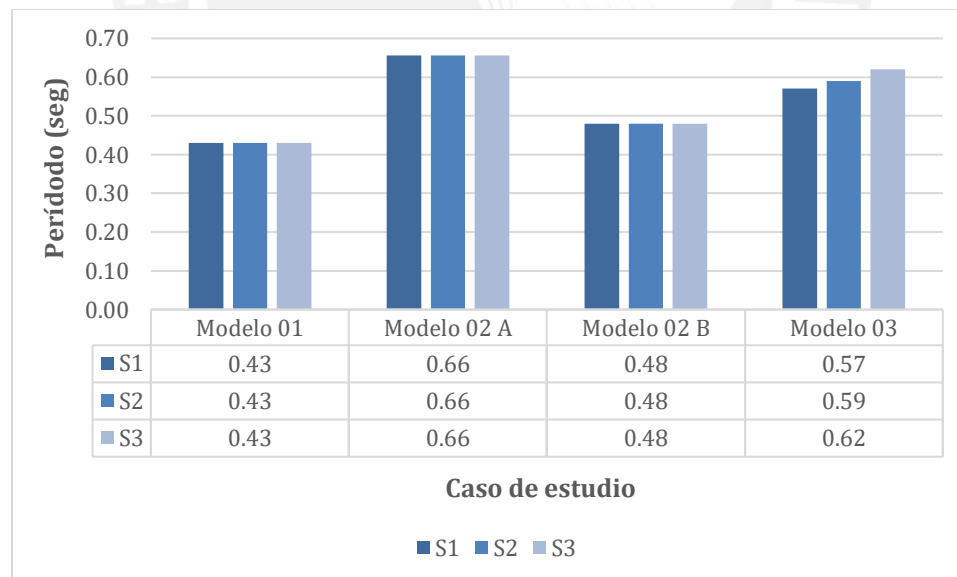


Figura 19. Períodos fundamentales de la estructura según modelo y tipo de suelo para sismo en YY

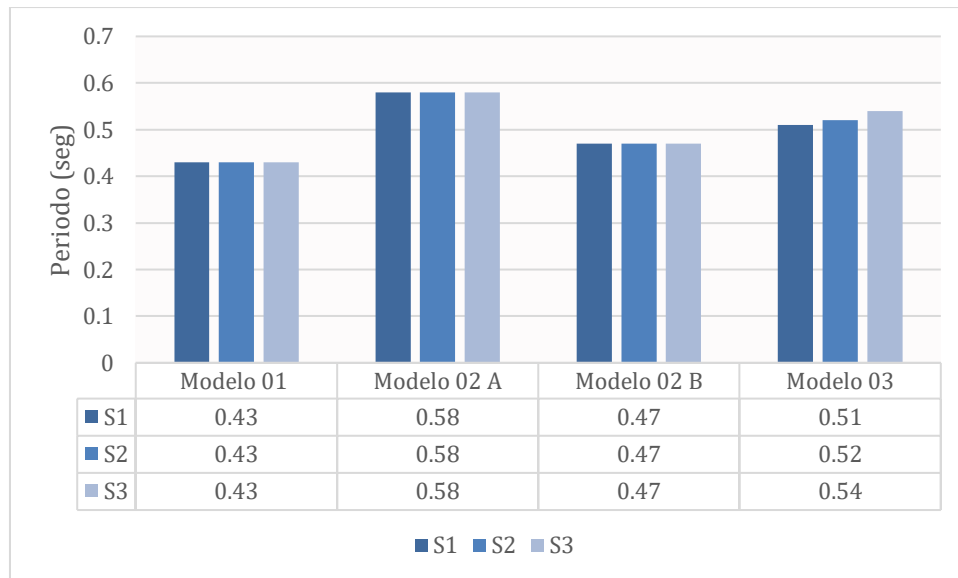


Figura 20. Periodos fundamentales de la estructura según modelo y tipo de suelo para sismo en XX

De la Figuras 19 y 20, se observan que los modelos 01, 02A y 02B tienen los mismos periodos para los tres tipos de suelo, ya que para estos el caso modal no depende del tipo de suelo. Por el contrario, en el modelo 03 se puede verificar que para cada tipo de suelo se tienen diferentes periodos; puesto que el suelo y sus propiedades, componentes que forman parte del modelado, cambian de acuerdo al tipo de suelo. Es por ello que en suelo de mejores propiedades (S1) se tiene un menor periodo que el del suelo (S3) que representa a un suelo blando.

Dado que, cuando se tiene un edificio cimentado sobre roca o suelo duro y con sistema de muros estructurales, se asimila al comportamiento de un voladizo perfectamente empotrado en la base y tendrá su menor periodo de vibración; del mismo modo para un edificio aperticado asemejando una viga tipo corte que tiene desplazamientos de entrepiso que decrecen con la altura (Muñoz, 2018). No obstante, cuando se está cimentado sobre un suelo blando, el conjunto suelo-estructura tiene una mayor flexibilidad y se incrementa su periodo, comportándose similar a un sistema parcialmente empotrado a causa de la deformación del empotramiento (Domínguez, 2014).

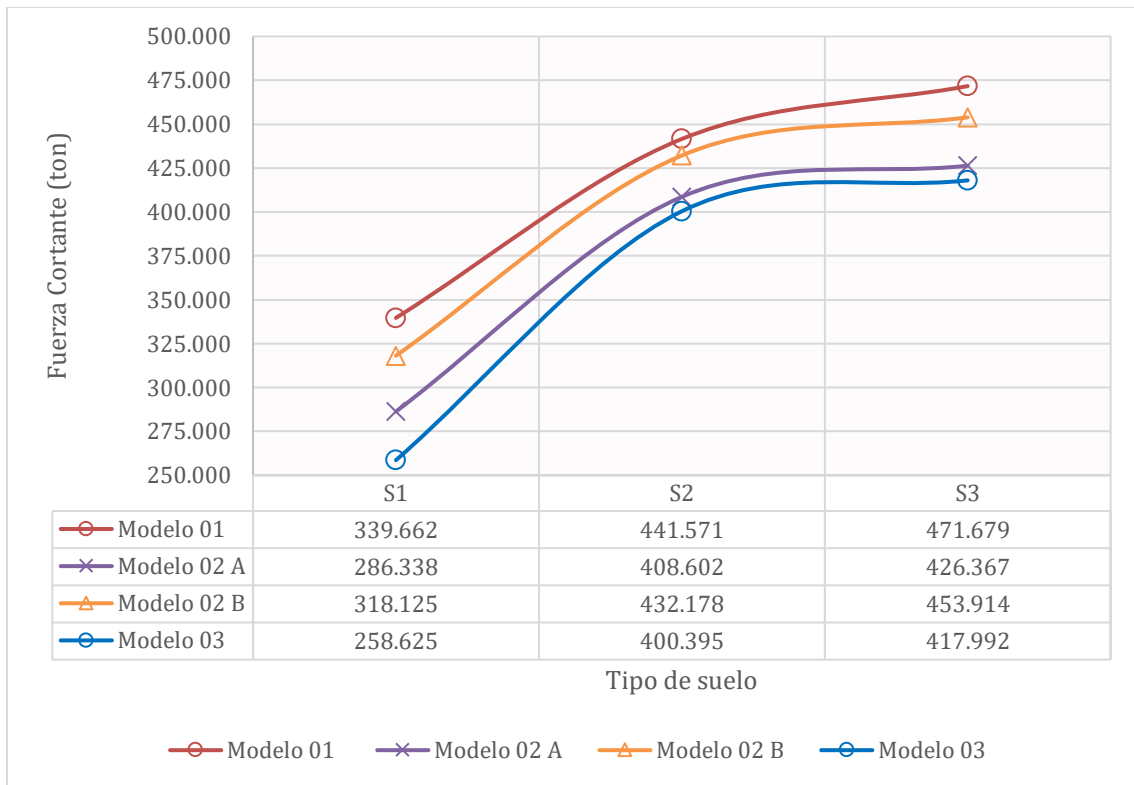


Figura 21. Fuerzas cortantes basales para sismo en X según tipo de suelo y caso de estudio. Fuente: propia.

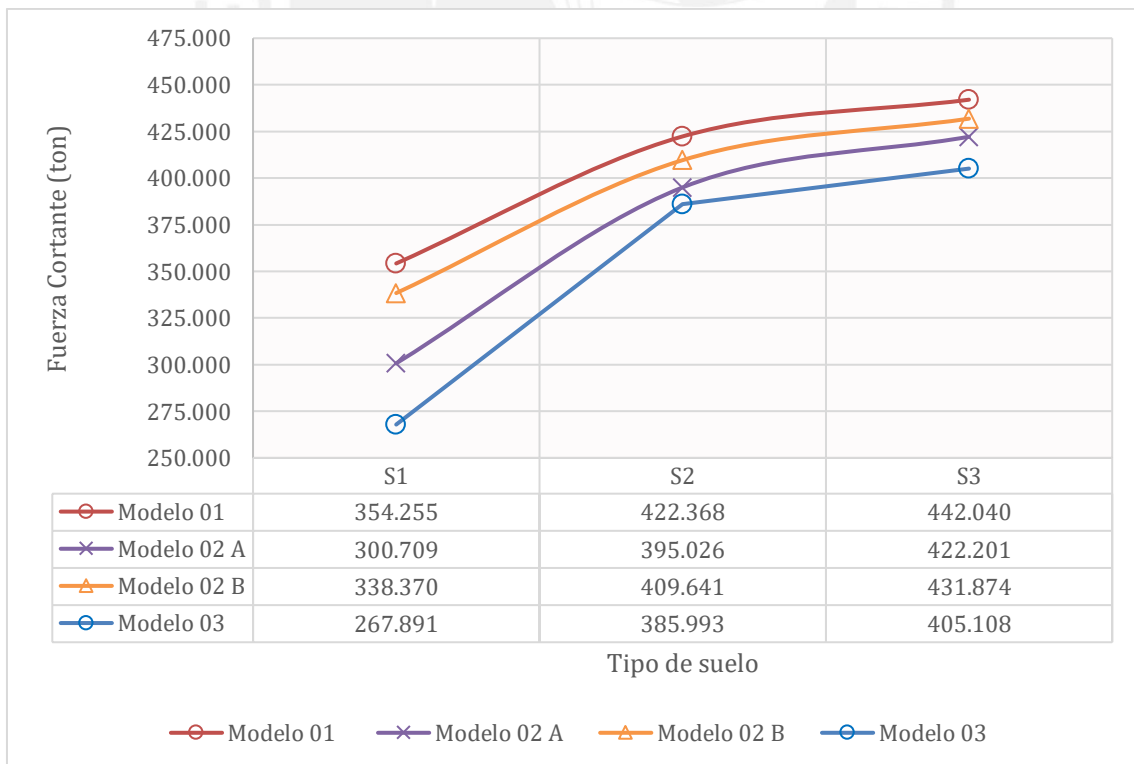


Figura 22. Fuerzas cortantes basales para sismo en Y según tipo de suelo y caso de estudio. Fuente: propia.

Las Figuras 21 y 22 muestran las magnitudes de las cortantes basales para las direcciones X y Y, las cuales se incrementan conforme disminuye la rigidez del tipo del suelo. Asimismo, en el modelo 01 se obtiene las mayores fuerzas cortantes basales, debido a que tiene un menor periodo de vibración, además, se observa que las cortantes del eje Y son menores indicando que se tiene una mayor rigidez lateral en este eje.

5.2.1. RESULTADOS PARA SUELO TIPO S1

En esta sección, se muestran las gráficas obtenidas de los resultados del análisis modal espectral para los cuatro modelos considerando un suelo S1 y en las direcciones de sismo X y Y. Cabe señalar, la importancia de identificar la diferencia entre los valores de derivas de entepiso y desplazamientos absolutos inelásticos entre los modelos 2B y 03 debido a las condiciones similares: edificios con sótanos confinados.



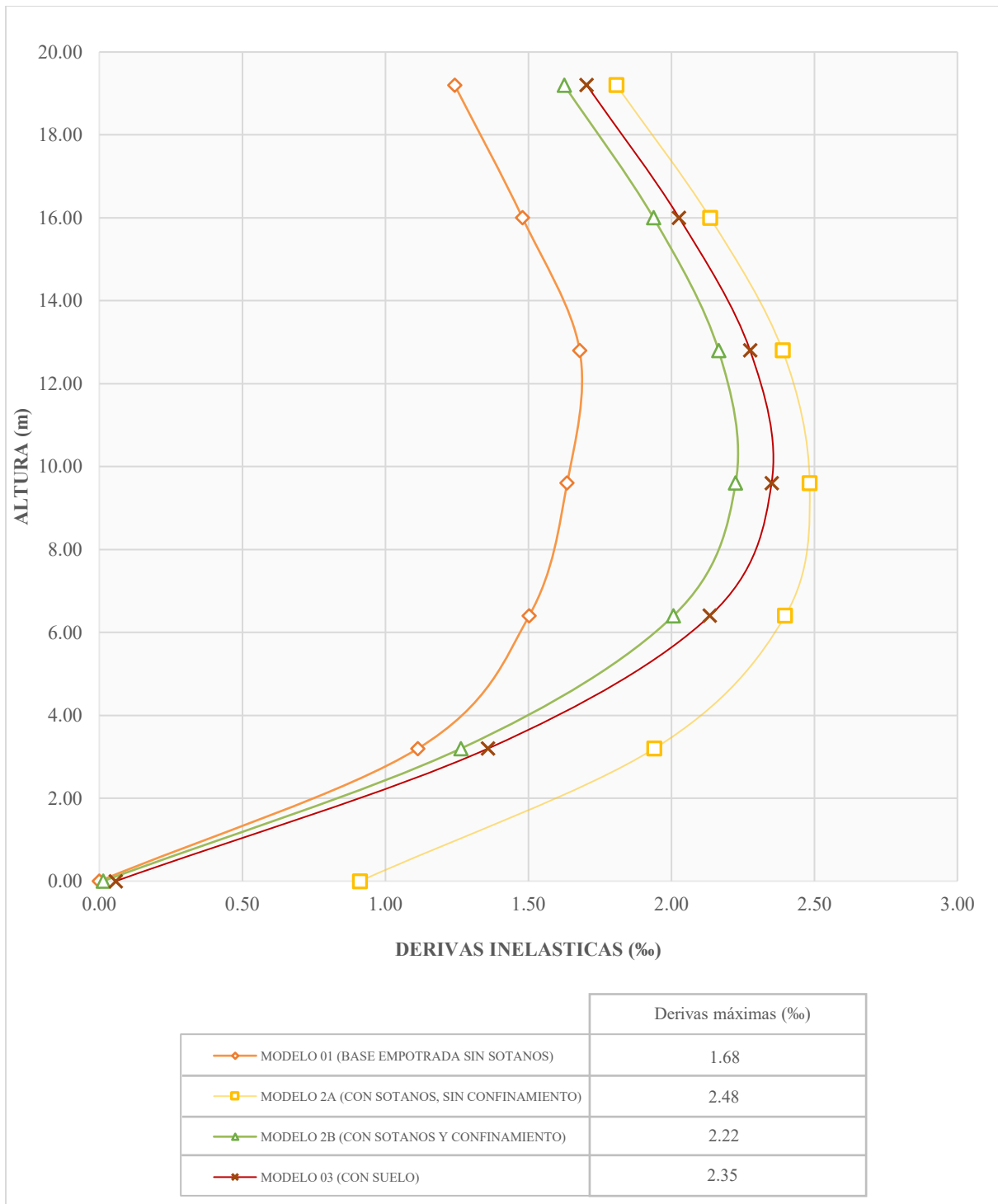


Figura 23. Derivas inelásticas para suelo S1 en X-X según caso de estudio y altura del edificio.
Fuente: propia.

De la Figura 23, se puede apreciar que el modelo 03 para un perfil de suelo tipo S1 tiene mayores valores de derivas inelásticas de entrepiso que los modelos 01 y 02B conforme se incrementa la altura del edificio. En efecto, para el tercer piso de altura 9.6m, el valor de la deriva inelástica para el modelo 03 representa un aumento de 5% del valor de deriva para el modelo 02B. Sin embargo, a la misma altura se observa una mayor deriva para el modelo 02A

debido a que no tiene restricciones de desplazamiento a nivel de superficie. Asimismo, se muestra un comportamiento similar y una diferencia poco significativa para los cuatro modelos según aumenta la altura de edificio; encontrándose mayores derivas para el modelo 02A, menores para el modelo 01 e intermedias para el modelo 02A y modelo 03.

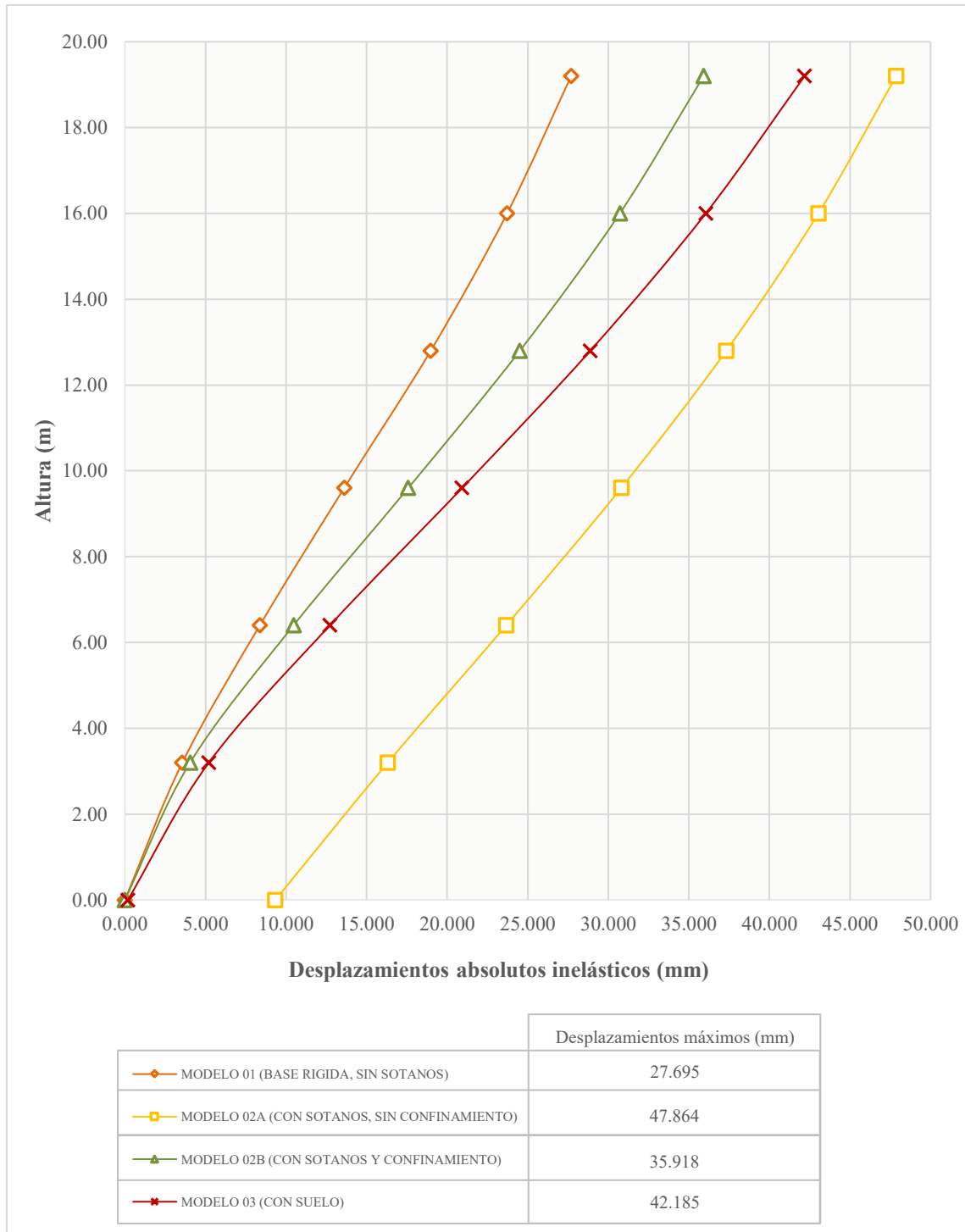


Figura 24. Desplazamientos absolutos inelásticos para suelo S1 en X-X según caso de estudio y altura del edificio. Fuente: propia.

De la Figura 24, se puede mencionar que los desplazamientos inelásticos del modelo 03 son menores a los valores del modelo 02B, pero presenta mayores desplazamientos que los modelos 1 y 2A conforme se incrementa el número de pisos del edificio. En el piso 1, la diferencia entre los modelos 03 y 2B es de 5 mm; mientras que en el piso 6, es de 10mm. Esto se debe principalmente a las restricciones que caracteriza a los modelos en los sótanos.

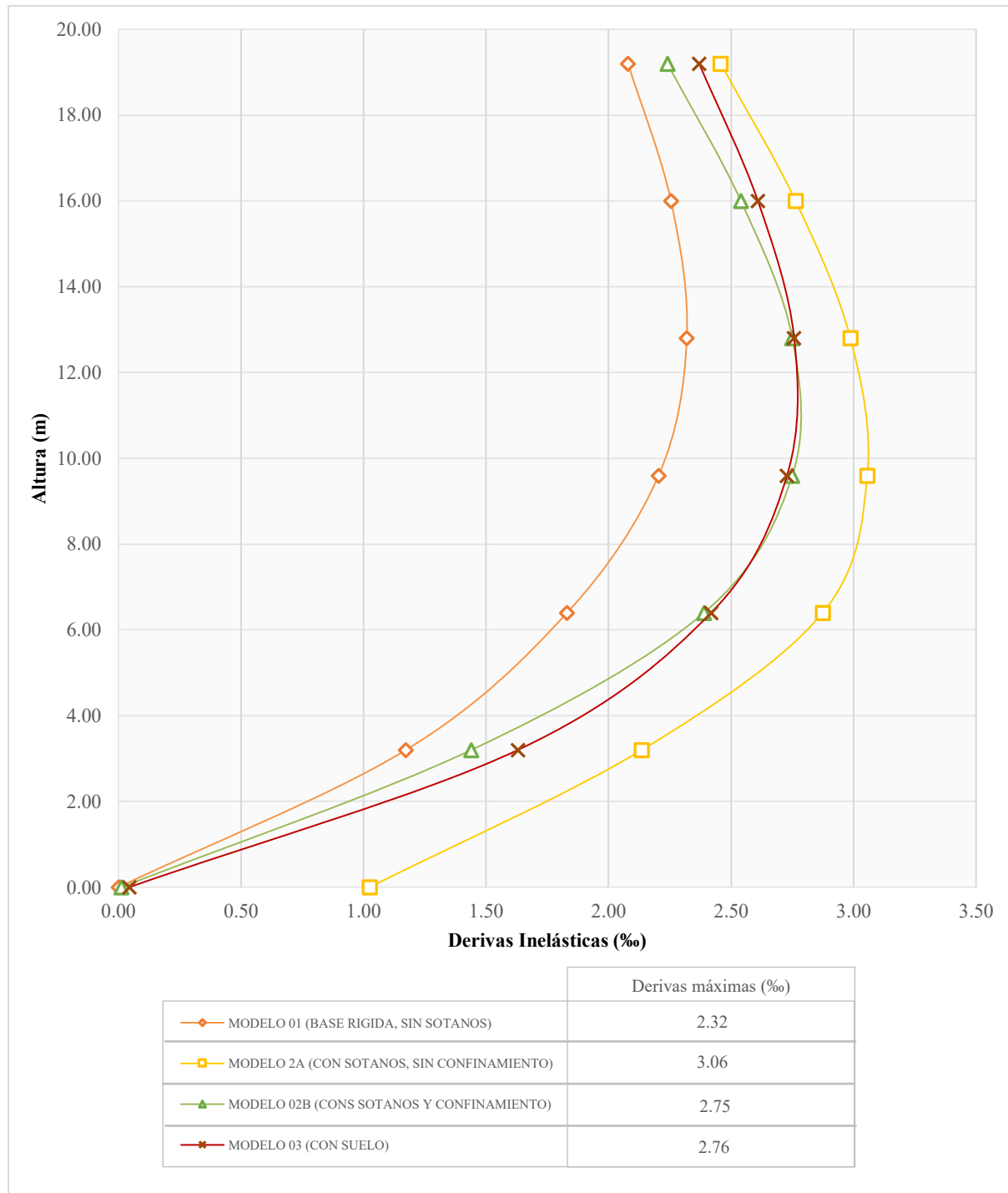


Figura 25. Derivas de entrepiso inelásticas para suelo S1 en Y-Y según caso de estudio y altura del edificio. Fuente: propia.

De la Figura 25, se puede observar que el modelo 02A tiene los mayores valores de derivas de entrepiso en comparación a los otros modelos desde el nivel de superficie hasta el último piso del edificio. Así, en la azotea, se muestra que el valor de deriva de entrepiso para el modelo 03 es mayor en 5% al valor del modelo 02B. Asimismo, se obtuvo los menores valores de deriva de entrepiso para el modelo 01 dado que no considera la influencia de los pisos inferiores al nivel de superficie.

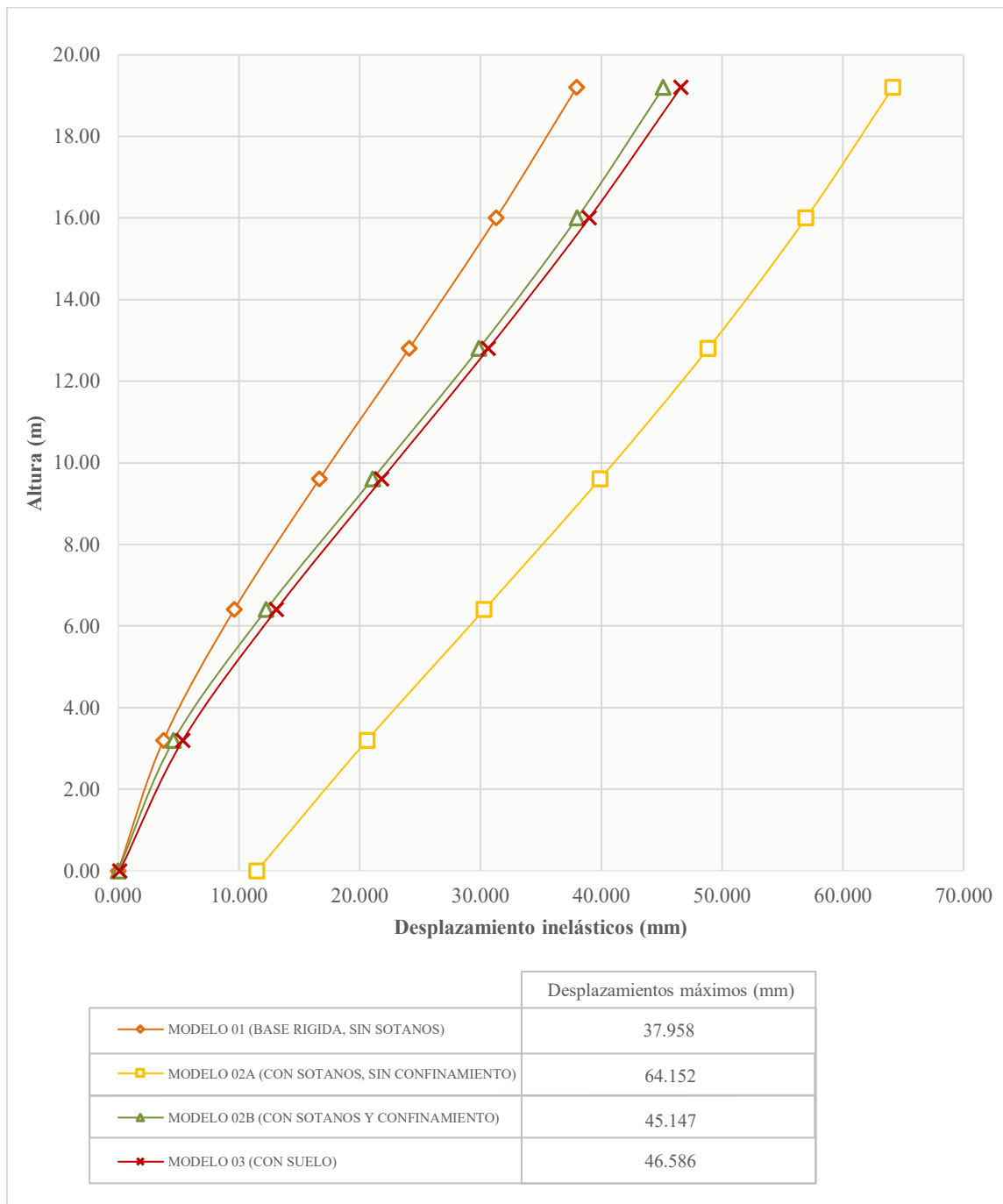


Figura 26. Desplazamientos absolutos inelásticos para suelo S1 en Y-Y según caso de estudio y altura del edificio. Fuente: propia.

De la Figura 26, se puede mencionar que el modelo 03 presenta desplazamientos que se encuentran entre los resultados del modelo 02A y 02B. Se aprecia un comportamiento cercano al modelo 02B debido a que ambos presentan un confinamiento en los niveles inferiores. A modo de ejemplo, el desplazamiento obtenido en el modelo 03 representa un aumento de 3.19% del modelo 02B en la azotea. Esta ligera diferencia se debe principalmente al giro en la cimentación que considera el modelo 03 pues ocasiona un desplazamiento de 0.141 mm a nivel de superficie.

5.2.2. RESULTADOS PARA SUELO TIPO S2

En esta sección, se muestran las gráficas obtenidas de los resultados del análisis dinámico para cada variante considerando un perfil de suelo tipo S2. De igual manera, se destaca los resultados de derivas de entrepiso y desplazamientos inelásticos entre los modelos 03 y 02B; puesto que, ambos presentan comportamientos parecidos en las gráficas para las dos direcciones de sismo. Al igual que en la sección anteriormente señalada, se encuentran los menores resultados para el modelo 1 debido a la poca flexibilidad que aporta a la estructura.

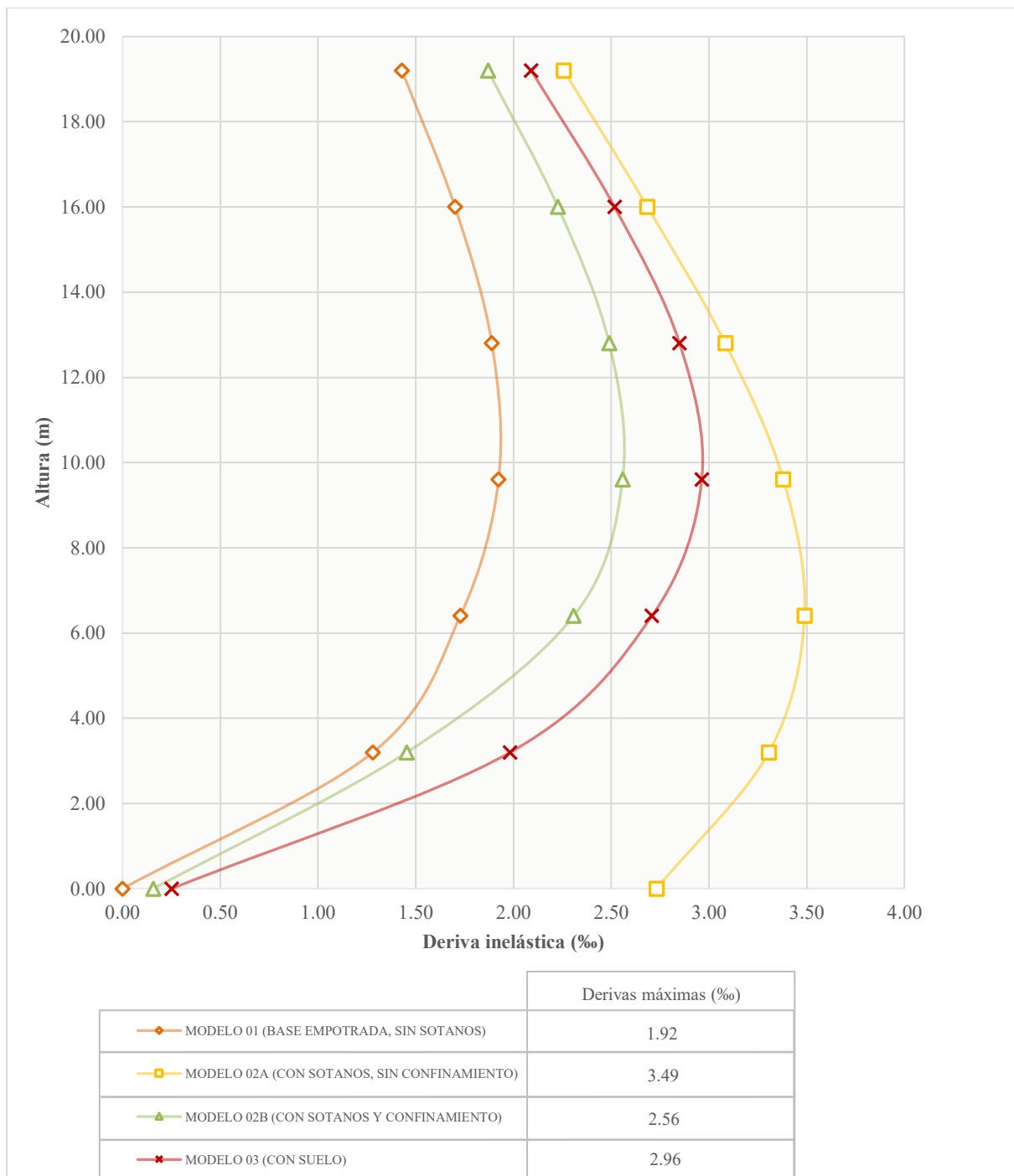


Figura 27. Derivas inelásticas para suelo S2 en X-X según caso de estudio y altura del edificio.
Fuente: propia.

De la Figura 27, se puede observar que el modelo 02A tiene mayores derivas que los otros casos de estudio y conforme se aumenta la altura del edificio su diferencia con los resultados de los modelos restantes es menor. Así, en la azotea, se muestra un mayor valor para el modelo 02A de 2.26‰; un valor intermedio para el modelo 03 de 2.09‰ y una menor deriva para el modelo 02B de 1.87‰. La diferencia entre los tres valores señalados se debe a las

restricciones de desplazamiento que los caracteriza. Asimismo, se muestra que los cuatro casos de estudio tienen una pendiente a partir de una altura de 9.6m.

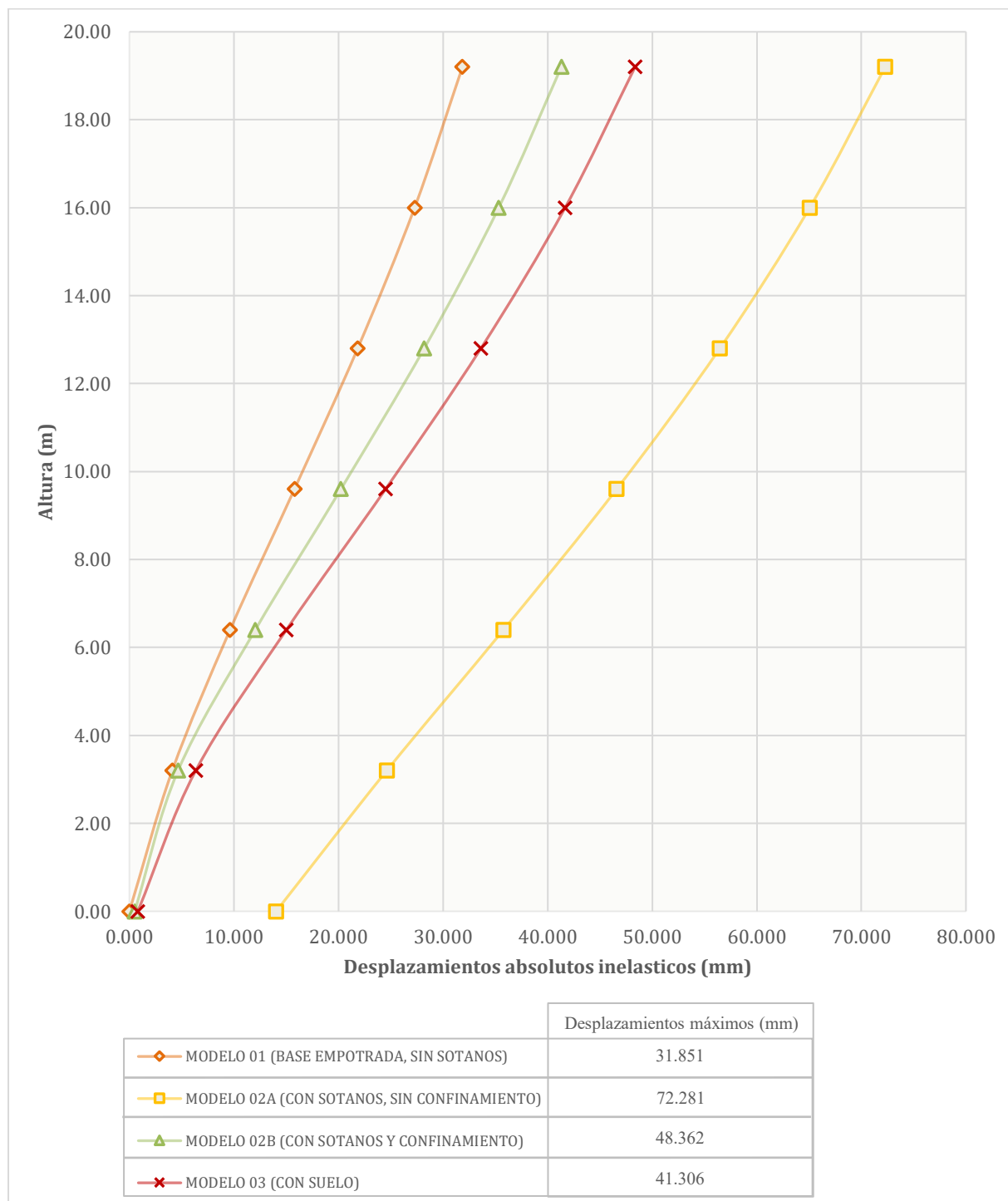


Figura 28. Desplazamientos absolutos inelásticos para suelo S2 en X-X según caso de estudio y altura del edificio. Fuente: propia.

De la Figura 28, se puede mencionar que los resultados de desplazamiento en el modelo 03 se encuentra entre los desplazamientos del modelo 02B y modelo 02 a lo alto del edificio.

A partir de lo indicado, se observa en el piso inferior que el desplazamiento del modelo 2A no empieza en el origen de las coordenadas, pues las características que tiene el caso de estudio permiten desplazamientos a nivel de superficie. Además, se tiene un desplazamiento máximo en el modelo 03 que indica un aumento del 12% del valor obtenido del modelo 02B a la altura de la azotea.

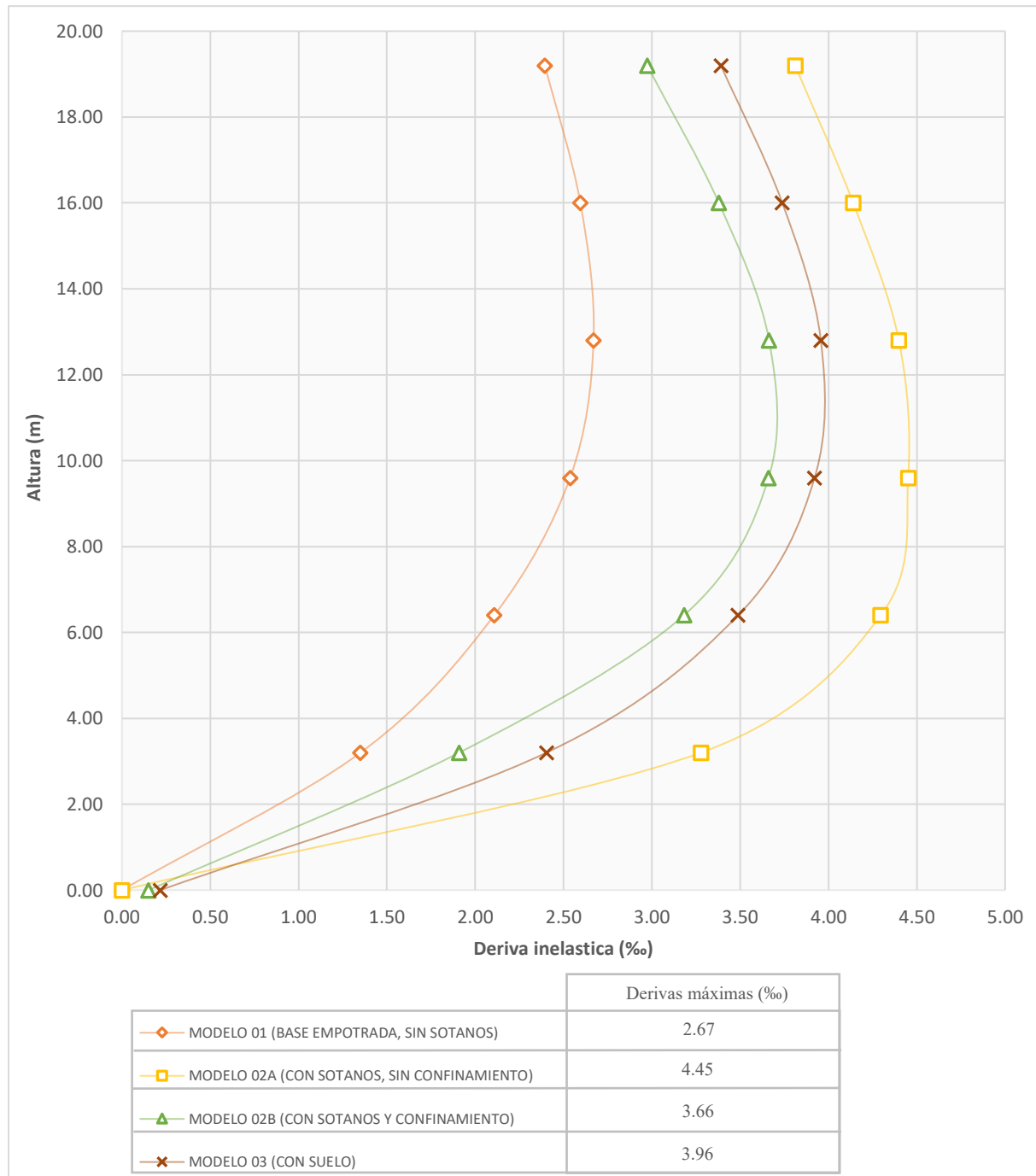


Figura 29. Derivas inelásticas para suelo S2 en Y-Y según caso del estudio y altura del edificio.
Fuente: propia.

De la Figura 29, se puede observar que el modelo 02A tiene mayores derivas en comparación a los otros casos de estudio en todos los niveles del edificio cuando ocurre un sismo en Y. Asimismo, los valores del modelo 03 se encuentran entre los valores del modelo 2B y modelo 2A. Este comportamiento se presenta debido a las diferentes condiciones de apoyo en la subestructura de los casos de estudio. A modo de ejemplo, se obtiene en la azotea, una deriva en el modelo 03 que señala un incremento del 14% del valor obtenido en el modelo 02B y un 12% menos con relación al modelo 02A.

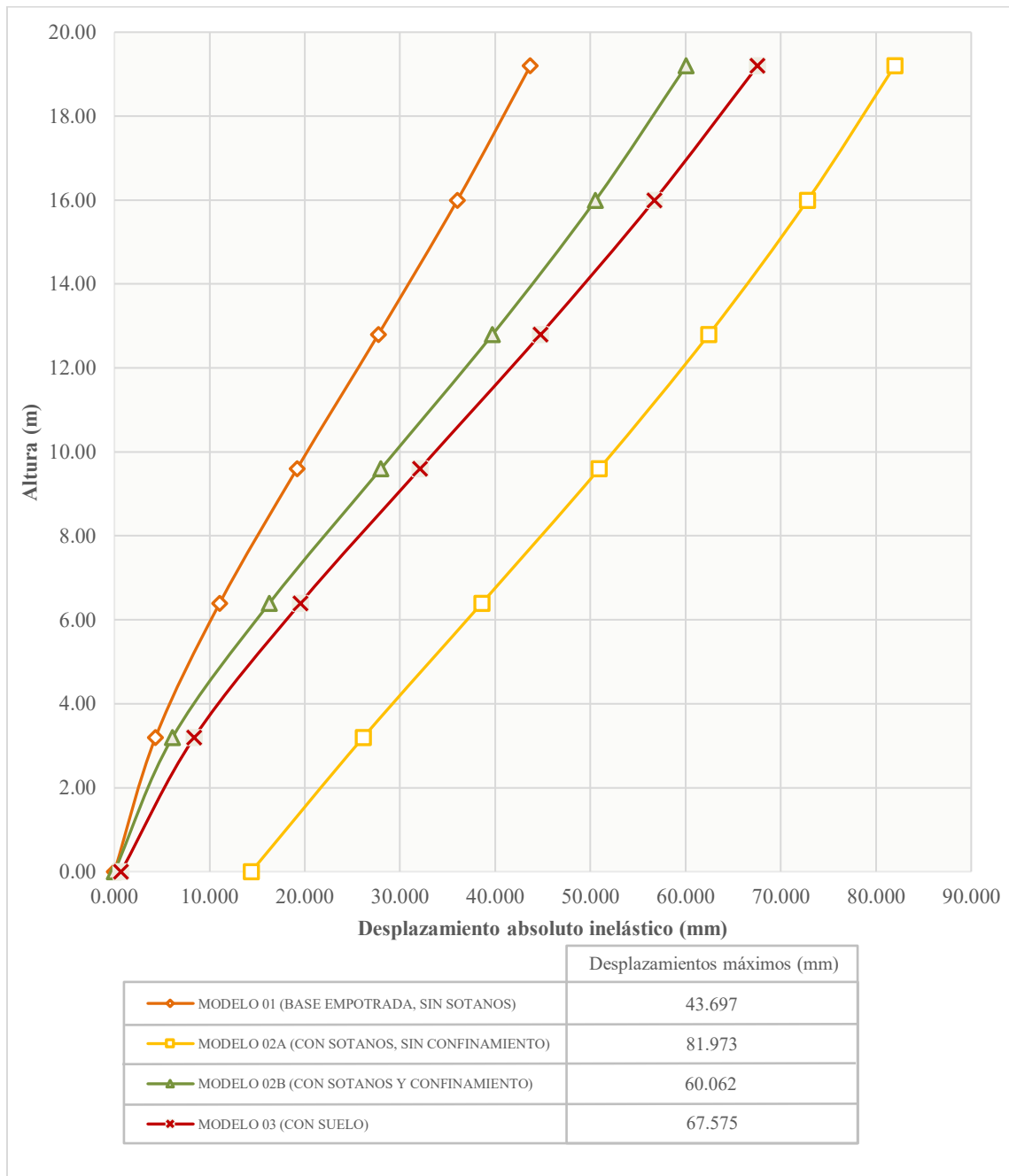
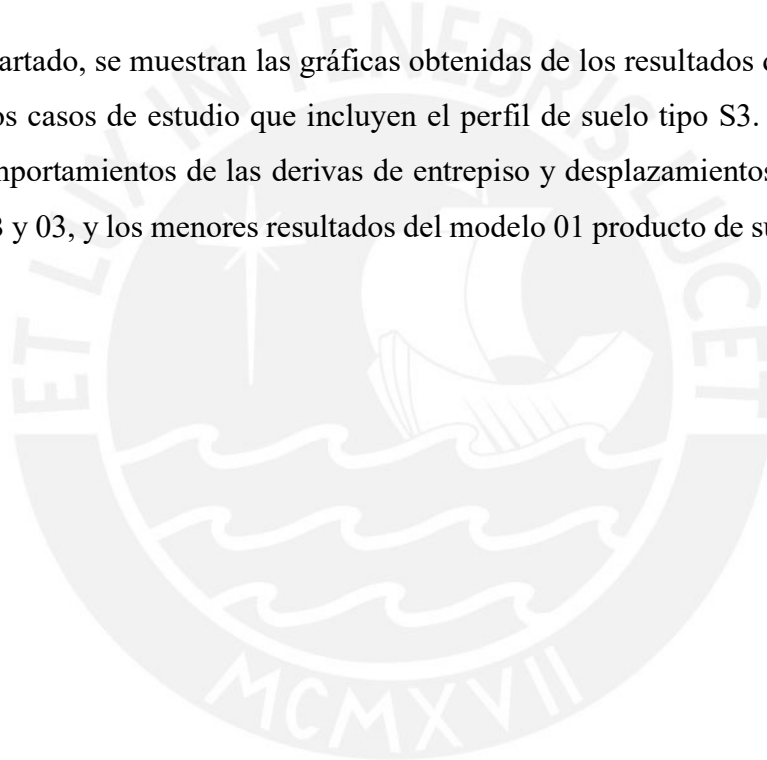


Figura 30. Desplazamientos absolutos inelásticos para suelo S2 en Y-Y por caso de estudio y altura del edificio. Fuente: propia.

De la Figura 30, se puede mencionar que los desplazamientos resultantes del modelo 03 se encuentran entre los desplazamientos del modelo 02A y 02B, como producto al giro en la cimentación que se origina en el modelo 03 y los desplazamientos que se generan en la base. Asimismo, conforme se incrementa la altura del edificio, se muestra una mayor diferencia entre los desplazamientos del modelo 02B y el modelo 03. Siendo el caso, en la azotea, encontrándose los máximos resultados para los casos de estudio, el modelo 03 representa un aumento del 13% del valor del modelo 02B mostrado.

5.2.3. RESULTADOS PARA SUELO TIPO S3

En este apartado, se muestran las gráficas obtenidas de los resultados del análisis modal espectral para los casos de estudio que incluyen el perfil de suelo tipo S3. Se distinguen los resultados y comportamientos de las derivas de entrepiso y desplazamientos inelásticos entre los modelos 02B y 03, y los menores resultados del modelo 01 producto de sus limitantes en el piso 0.



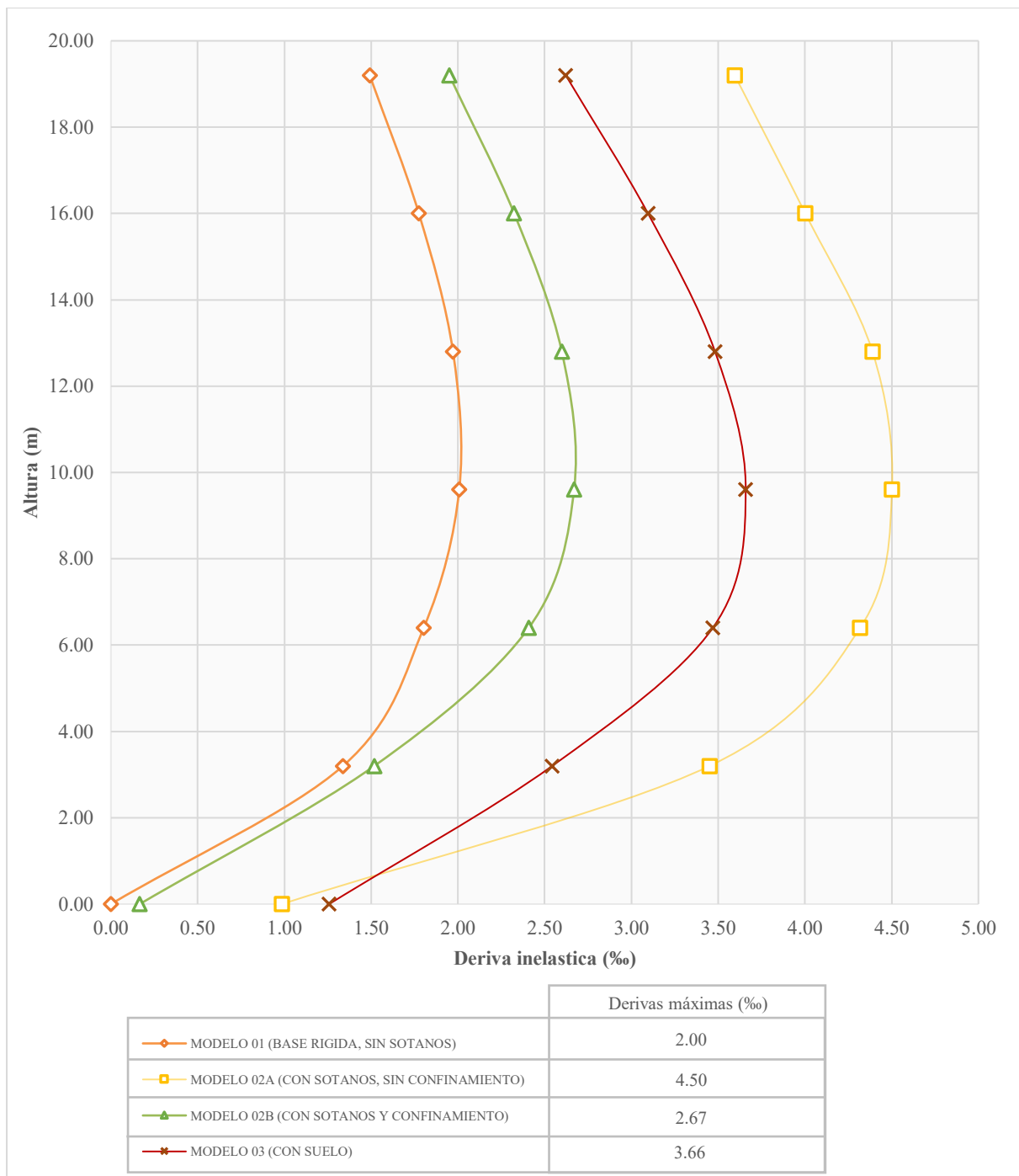


Figura 31. Derivas inelásticas para suelo S3 en X-X por caso de estudio y altura del edificio.
Fuente: propia.

De la Figura 31, se puede observar que el modelo 03 tiene mayores derivas que el modelo 02B y menores que el modelo 02A. En efecto, al comparar los resultados de deriva del modelo 02B, se obtiene un incremento del 34% y 37% en la azotea y tercer piso respectivamente con relación al modelo 03. Además, se observa una pendiente similar en los comportamientos de los casos de estudio en los pisos superiores.

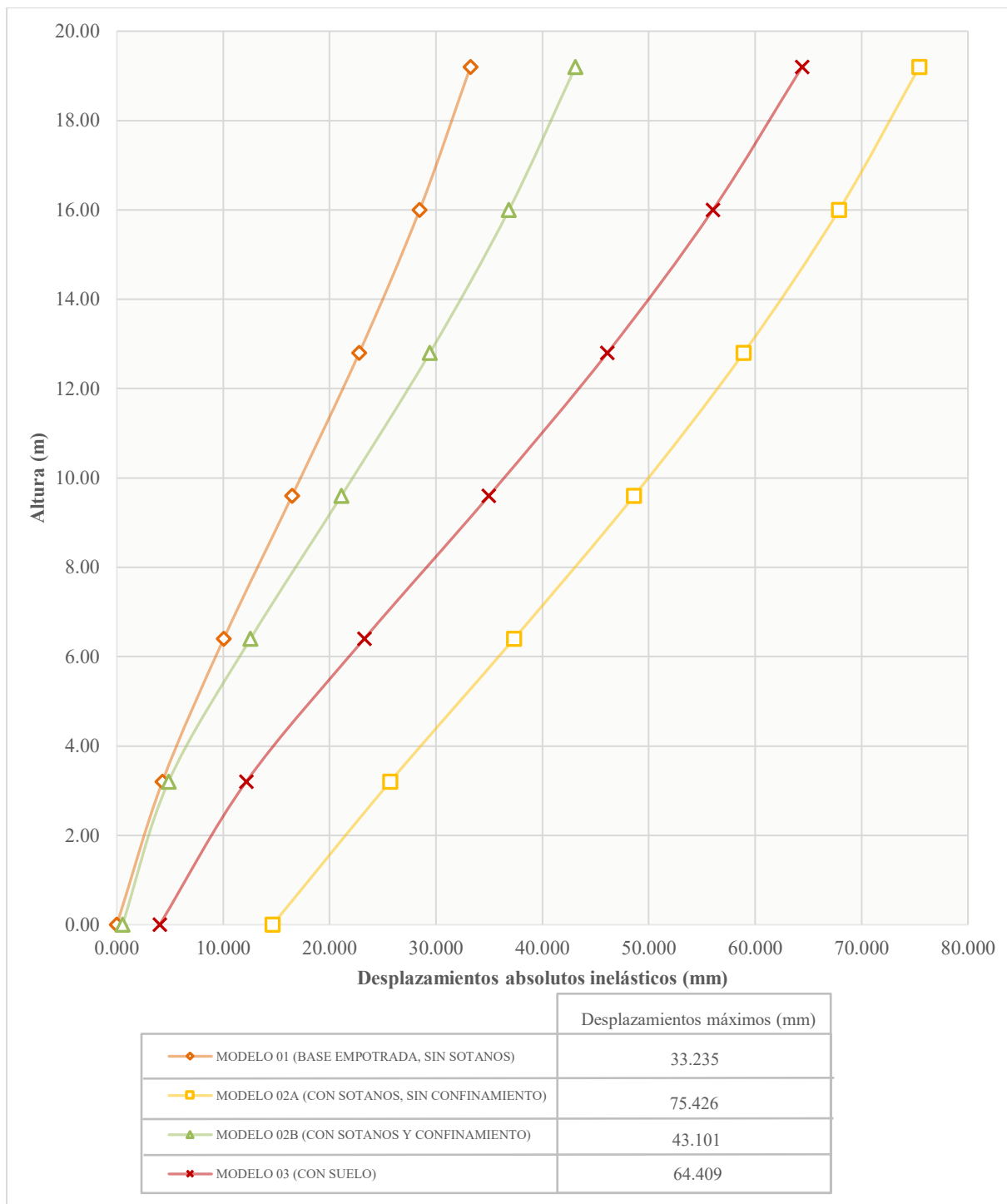


Figura 32. Desplazamientos absoluto elástico para suelo S3 en X-X por caso de estudio y altura del edificio. Fuente: propia.

De la Figura 32, se puede mencionar que los desplazamientos absolutos inelásticos del modelo 03 se encuentran entre los del modelo 02B y 02A, como producto al giro que se origina en la cimentación en el modelo 03. Así, en el nivel 0, se aprecia un desfase respecto al origen de coordenadas porque existen desplazamientos en los modelos 03 y 02A. Además, en la

azotea, se obtiene el menor incremento de 49% entre los valores de desplazamiento del modelo 03 y el modelo 02B.

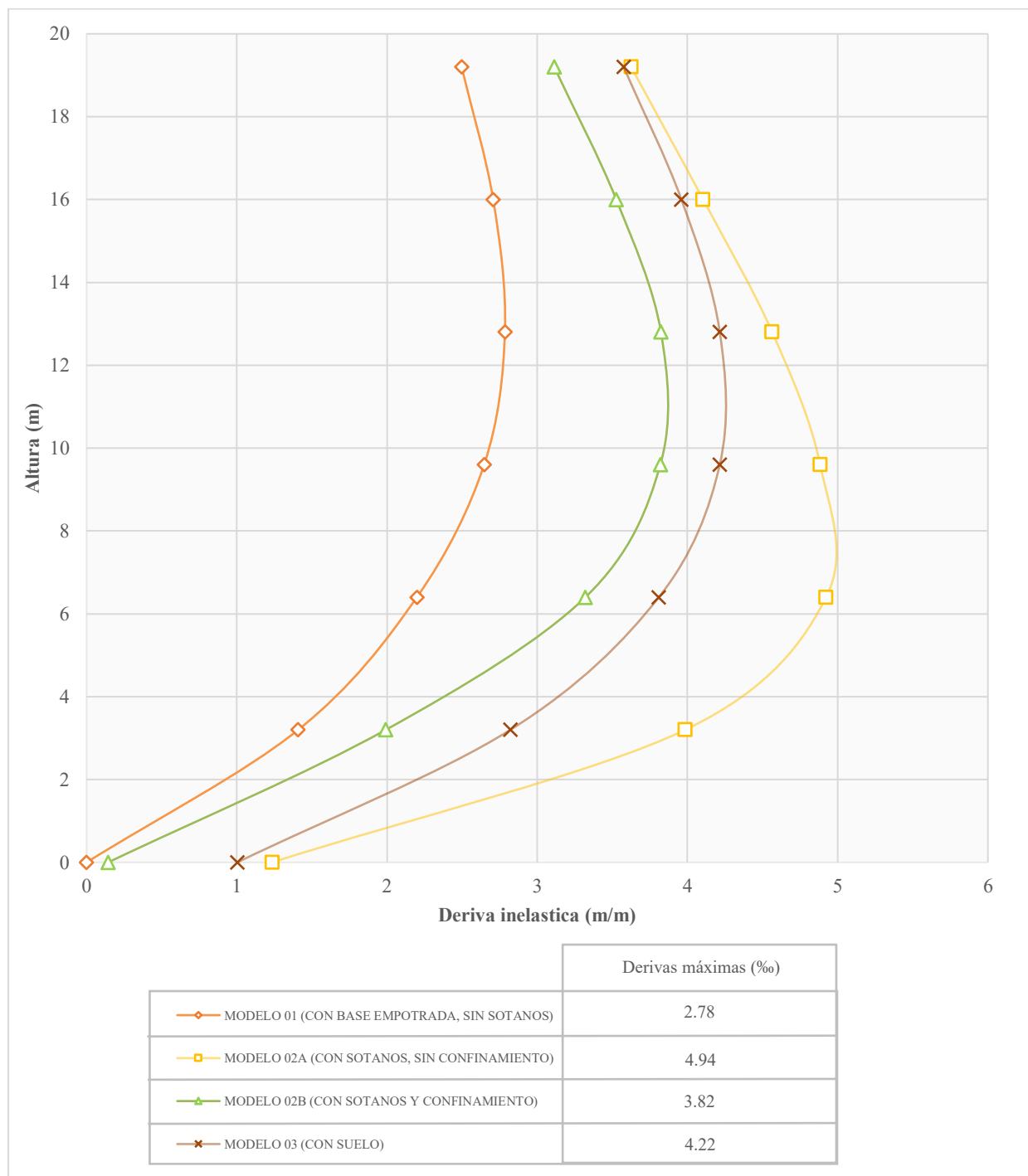


Figura 33. Derivas inelásticas para suelo S3 en Y-Y por caso de estudio y altura del edificio.

Fuente: propia.

De la Figura 33, se puede observar que el modelo 02A tiene mayores derivas en comparación a los otros modelos debido a que no tiene restricción en los apoyos de la estructura

enterrada. Sin embargo, conforme se aumenta la altura del edificio, su diferencia con los demás casos de estudio disminuye. Asimismo, en la azotea, se obtiene la deriva del modelo 03 con un incremento del 15% del valor obtenido en el modelo 02B.

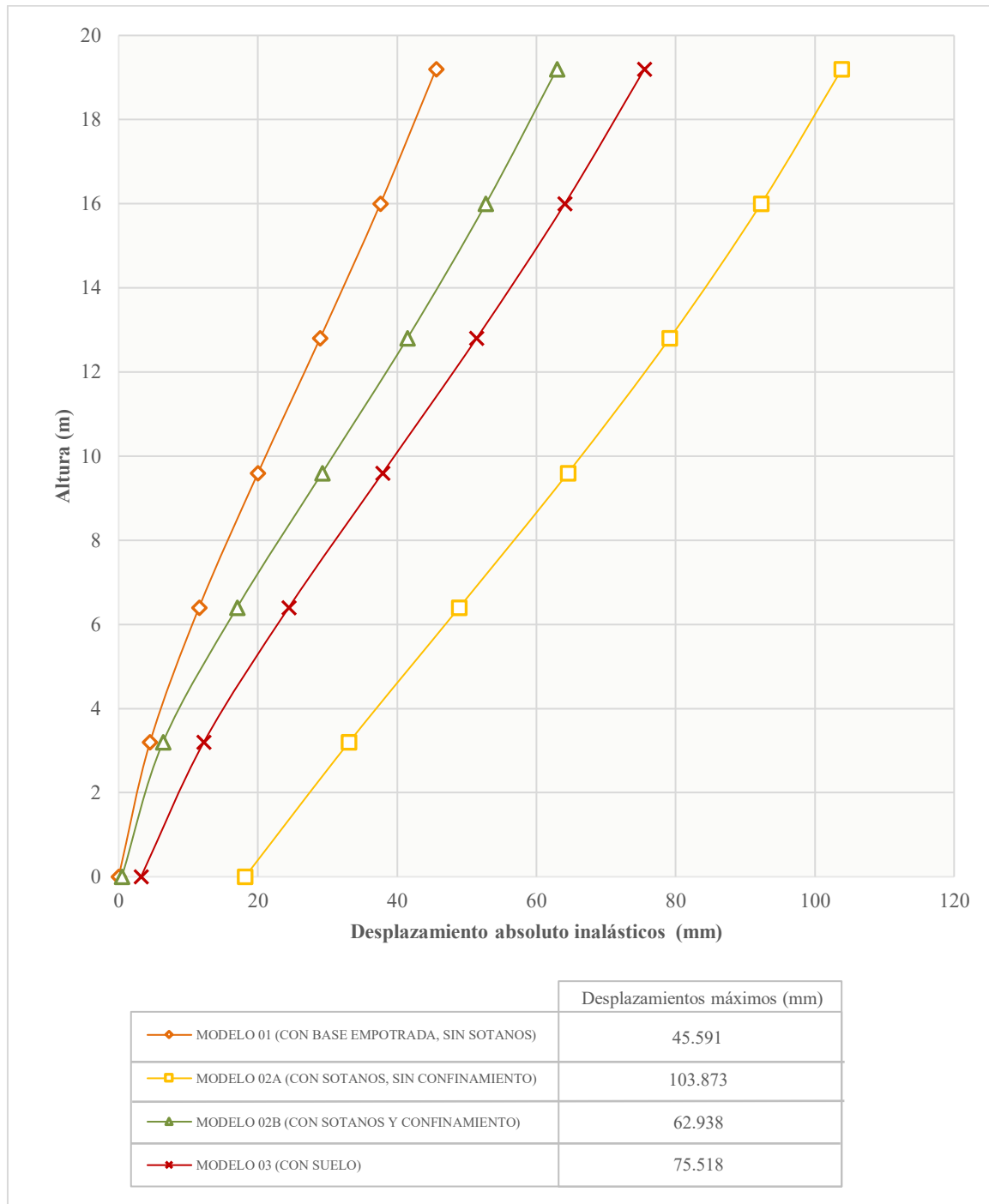


Figura 34. Desplazamientos absolutos inelásticos para suelo S3 en Y-Y por caso de estudio y altura del edificio. Fuente: propia.

De la Figura 34, se puede mencionar que los desplazamientos resultantes del modelo 03 se encuentran entre los desplazamientos del modelo 2A y 2B, debido al giro surgido en la

cimentación en el modelo 3 por las condiciones que los caracterizan en la subestructura. De ese modo, se obtiene un en la azotea, se obtiene un desplazamiento del modelo 03 con un incremento del 20% del valor obtenido en el modelo 02B. Igualmente, se aprecia que los comportamientos de los casos de estudio guardan una pendiente similar acorde al incremento de altura.



CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. DETERMINACIÓN DE LA IMPORTANCIA DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

La guía práctica para el análisis de interacción suelo estructura FEMA P-2091 del NERPH (2020) describe un método simple que puede ser usado al inicio de un proyecto cuando se tiene información limitada. Este método es útil para determinar si el uso del efecto de ISE es relevante en el proyecto y podría traer resultados diferentes. Sin embargo, solo se limita a determinar si la interacción inercial tiene relevancia en el análisis. De este modo, el análisis combina tres simples parámetros los cuales son: altura del edificio, período fundamental y velocidad de onda de corte. Esta relación entre los parámetros presentados se le denomina “Relación estructura-rigidez del suelo” La ecuación para realizar este análisis es la siguiente:

$$\frac{h'}{v_s T} < 0.1$$

Donde:

- h' : altura efectiva de la estructura, medida desde la base de la fundación hasta el centro de masa de la del modo fundamental. La cual puede ser de $2.3h_n$, donde h_n la altura de la estructura hasta el fondo de la cimentación (ft).
- v_s : promedio efectivo de la velocidad de ondas de corte (ft/s) de las condiciones del suelo de sitio.
- T : Período fundamental de la estructura asumiendo una base fija a nivel (segundos).

Cabe mencionar que si el valor de la relación anterior presentada es mayor a 0.1, entonces, se debe considerar el efecto de interacción suelo estructura en el análisis.

En base a ello, se elaboró la siguiente tabla que muestra la relación para la presente estructura de acuerdo al caso de estudio y tipo de suelo.

Tabla 30. Determinación de la importancia de la interacción suelo – estructura

Modelo	Suelo	Altura total (m)	Altura efectiva (m)	Velocidad de onda de corte (m/s)	Período (s)	Relación	< 0.1
1	S1	25.60	19.20	1499.62	0.45	0.03	no requiere
02A	S1	25.60	19.20	1499.62	0.66	0.02	no requiere
02B	S1	25.60	19.20	1499.62	0.49	0.03	no requiere
3	S1	25.60	19.20	1499.62	0.45	0.03	no requiere
1	S2	25.60	19.20	499.87	0.45	0.09	no requiere
02A	S2	25.60	19.20	499.87	0.66	0.06	no requiere
02B	S2	25.60	19.20	499.87	0.49	0.08	no requiere
3	S2	25.60	19.20	499.87	0.49	0.08	no requiere
1	S3	25.60	19.20	179.95	0.45	0.24	requiere
02A	S3	25.60	19.20	179.95	0.66	0.16	requiere
02B	S3	25.60	19.20	179.95	0.49	0.22	requiere
3	S3	25.60	19.20	179.95	0.57	0.20	requiere

Se obtiene que en el suelo 3 el análisis considerando ISE, es relevante, por lo cual bajo este análisis preliminar se deberá considerar esta condición.

6.2. COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS SEGÚN TIPO DE SUELO

En base a los resultados obtenidos, se procedió a elaborar tablas comparativas para poder visualizar cómo varían los desplazamientos según la condición del suelo y las características de cada modelo.

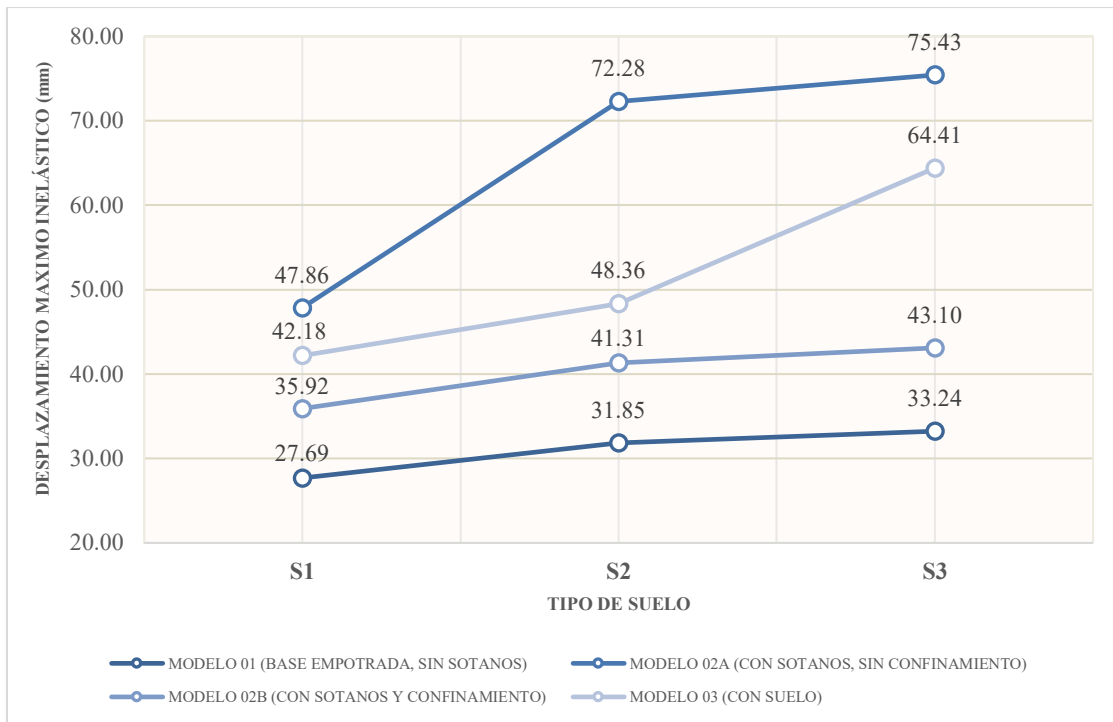


Figura 35. Desplazamientos máximos en la azotea por tipo de suelo con dirección de sismo X.
Fuente: Propia.

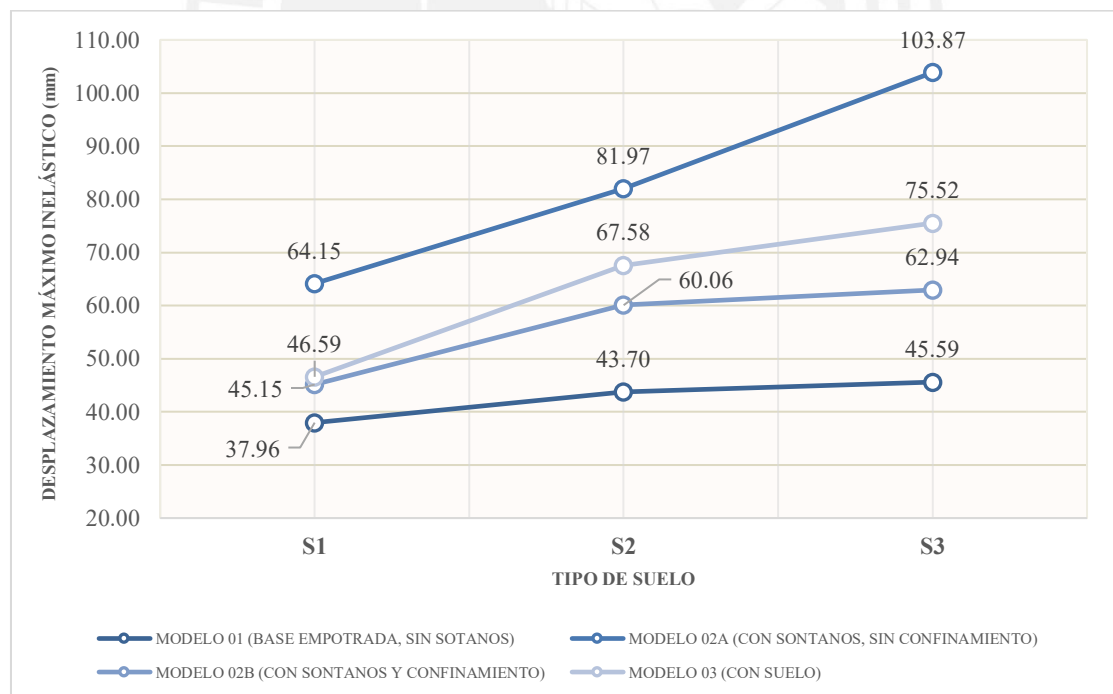


Figura 36. Desplazamientos máximos en la azotea por tipo de suelo en dirección de sismo Y.
Fuente: Propia.

En las Figuras 35 y 36, se puede observar que el modelo 02A, en ambas direcciones de sismo tiene un mayor desplazamiento en la azotea. Además, se observa que los resultados del modelo 03 se encuentra entre los desplazamientos obtenidos en el modelo 02B y 02A. Asimismo, se puede apreciar que los desplazamientos en dirección de sismo Y son mayores que los obtenidos en dirección de sismo X.

6.3. COMPARACIÓN DE DERIVAS MÁXIMAS SEGÚN TIPO DE SUELO

En base a los resultados obtenidos, se procedió a elaborar tablas comparativas con el fin de visualizar como varían las derivas de entrepiso en función del tipo de suelo y las características de cada modelo.

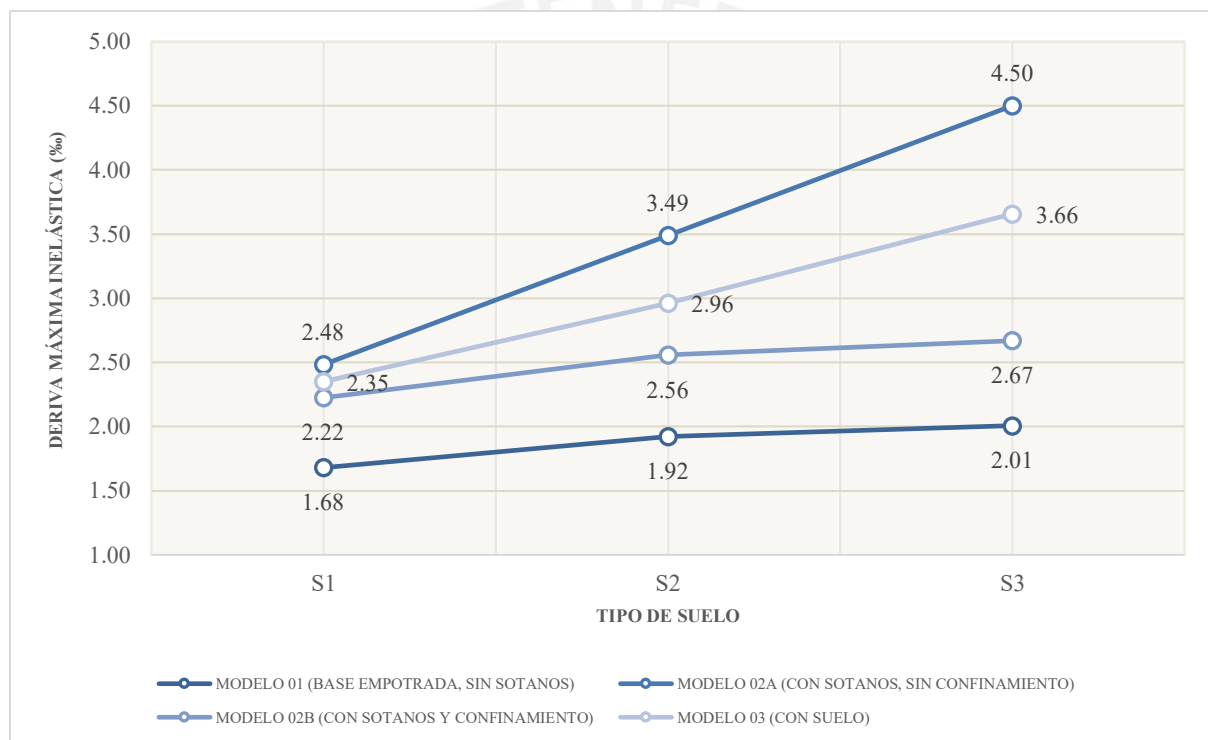


Figura 37. Derivas máximas por tipo de suelo en dirección de sismo X. Fuente: Propia.

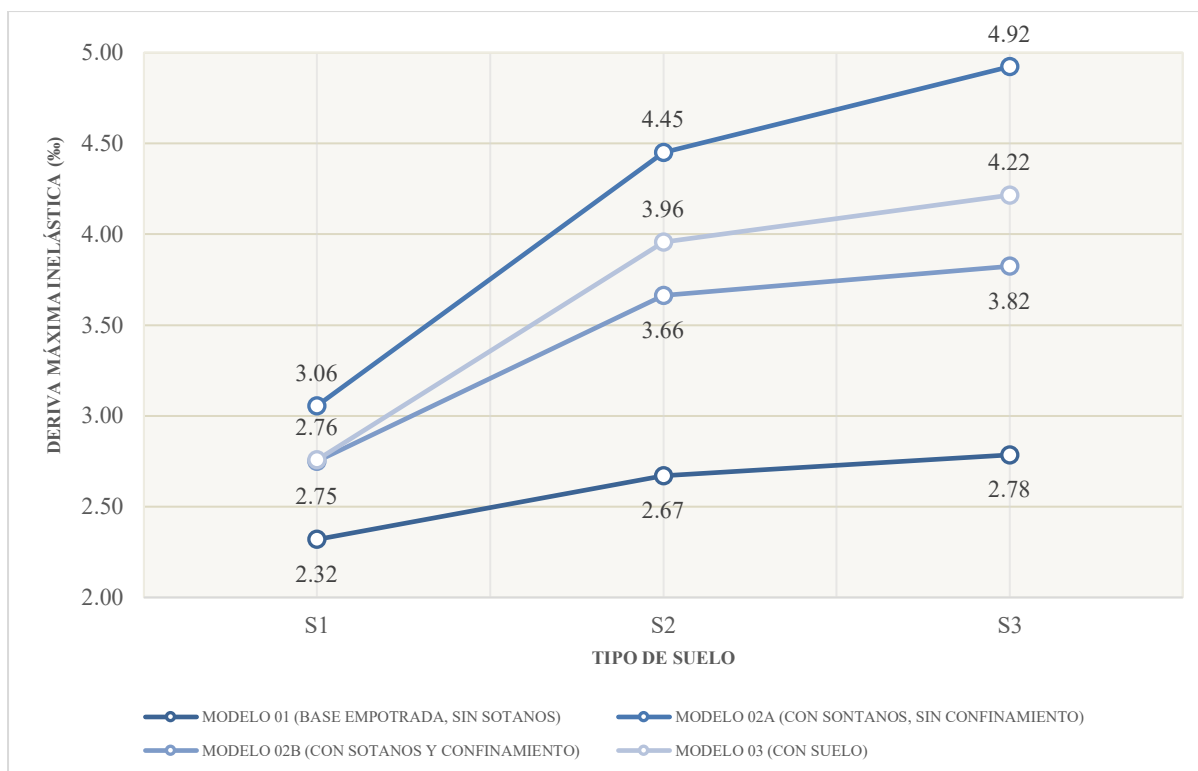


Figura 38. Derivas máximas por tipo de suelo en dirección de sismo Y. Fuente: Propia.

En la Figura 37, se puede apreciar que el modelo 02 A es el que tiene mayores derivas máximas en comparación a los demás modelos para suelo tipo S3. No obstante, para el suelo S1, se observa que los valores de derivas son bastante cercanos en cuanto a los modelos 02B, 03 y 02A. Asimismo, en la Figura 38 se puede observar que para el caso de suelo tipo S3, el modelo 02 A es el que tiene una deriva mayor que todos los otros modelos. Sin embargo, en cuanto a los suelos tipo S1 y S2 se obtuvieron valores de derivas similares para los modelos 03 y 02 B. Por último, se aprecia que los valores de derivas para el análisis en sismo en Y son mayores que en X.

6.4. COEFICIENTES PARA EDIFICIOS CON 2 SÓTANOS Y HASTA 6 PISOS

Asimismo, se proponen el uso de coeficientes que permitan de manera rápida poder calcular desplazamientos y derivas considerando ISE en estructuras con características similares a la estudiada en la presente investigación. Para ello, se ha representado la relación entre el modelo 02B (con sótanos y confinamiento en las paredes de estos) y el modelo 03 (considerando la ISE), ya que es usual modelar las estructuras con las mismas condiciones de borde que sean considerado para el análisis del presente edificios con sótanos.

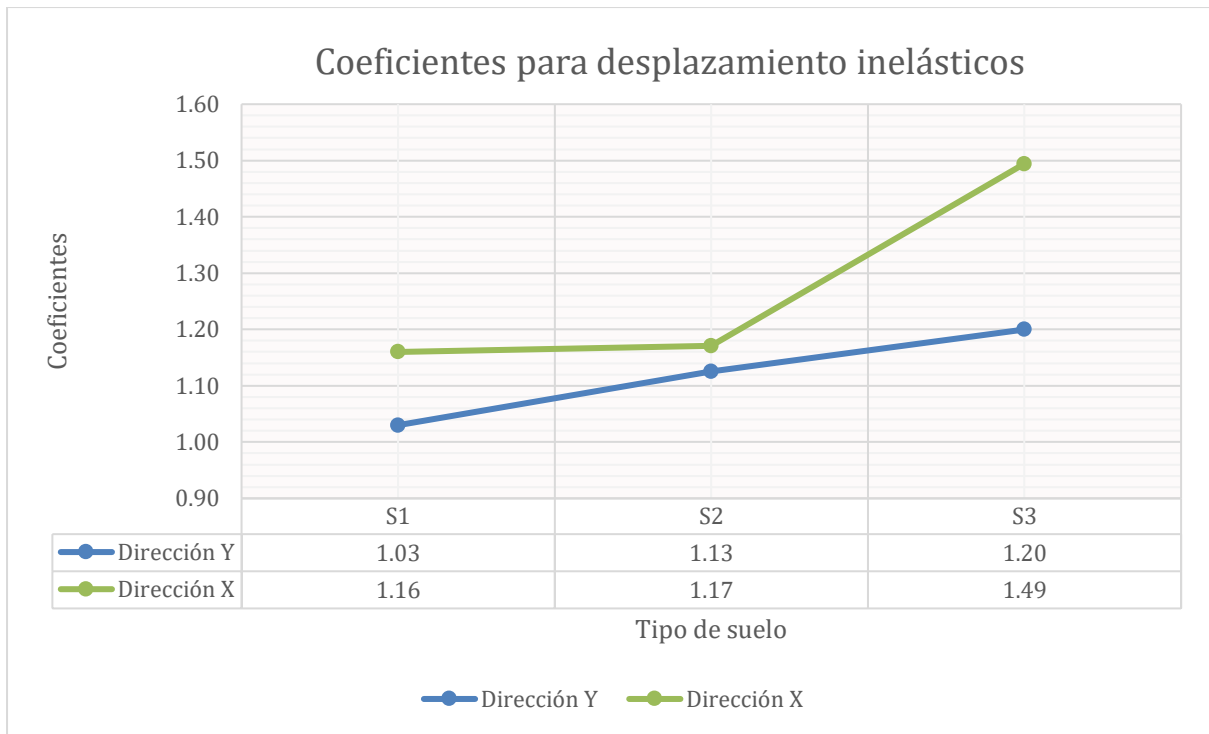


Figura 39. Coeficientes escala para desplazamientos y derivas inelásticas en sismo en X y Y. Fuente: Propia.

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

- Se verificó que el modelo 01, variante que tiene base empotrada al nivel de la superficie, no idealiza un comportamiento sísmico representativo. Esto se debe a que, al despreciar la influencia de su cimentación, esta aporta rigidez a la estructura generando periodos y desplazamientos menores a la realidad.
- Se verificó que en el modelo 03, en el cual el suelo está representado mediante elementos finitos sólidos, se obtienen resultados de hasta el doble con respecto a los desplazamientos y derivas del modelo 01. Asimismo, se evidencia que el modelo 03 tiene valores que se encuentran en el rango de los resultados de los modelos 2A y 2B, en los cuales se incluye los sótanos como parte del modelado y tienen condiciones de borde que se asemejan a la realidad. Por tal motivo, se concluye que estos modelos podrían dar resultados más reales, tal como es el caso del modelo 03 que considera ISE.
- Se puede observar que el efecto de volteo en la base y/o giro en la cimentación que presenta el modelo 03 por sus características, le genera una deformación adicional. Esta dimensión añadida se incrementa cuando se analiza con los suelos de menor rigidez.
- Para el estudio del modelo 03 se ha empleado el método de elementos finitos, debido a su complejidad. Para ello, se usan programas especializados en computadoras de buen rendimiento, ya que el procesamiento de los datos es extenso y el costo computacional de los programas puede llegar a ser alto para realizar estos análisis.
- Según el análisis de incidencia planteado en el FEMA 2091, se puede observar que la ISE es de importancia de forma preliminar en los casos de estudio considerando un suelo S3. No obstante, realizando el análisis sísmico considerando ISE, se obtuvieron

mayores desplazamientos, derivas y fuerzas cortantes para suelo tipo S1 y S2, con lo cual, se concluye que sería necesario un análisis más detallado.

- Se observó que a medida que cambia la rigidez del suelo los resultados obtenidos, tales como desplazamiento y derivas se incrementan. Esto se verificó con el incremento de porcentajes entre los resultados de los modelos 03 y 02B. Para el tipo de suelo S1 y S2 se obtuvo en promedio una variación de 15%; mientras que, para el tipo de suelo S3 las derivas tienen un incremento del 35% en promedio.
- Se observó que las cortantes basales con respecto al modelo 02 B y el modelo 01 para un S1 se incrementaron alrededor de un 7%, mientras que para un suelo S2 y S3, se incrementaron alrededor de 3%. Es importante mencionar que la ISE puede producir amplificaciones o reducciones del cortante basal, dependiendo mucho de los modos de vibración y el periodo fundamental de la estructura.
- Los coeficientes propuestos para edificios con características similares e iguales parámetros sísmicos a la estructura estudiada, pueden ser utilizados para determinar resultados a partir de un modelo 02B a uno que considere ISE para diferentes tipos de suelo. Esto se apoya al contrastar con los resultados preliminares de la ecuación propuesta en la FEMA P-2091, en el que se indican que es apreciable considerar su importancia.

7.2. RECOMENDACIONES

- Un parámetro que ha sido de importancia en el proyecto es la velocidad de onda de corte (V_s), para lo cual se recomienda que para hallar este parámetro se empleen ensayos de campo, tales como, el ensayo multicanal de ondas de superficie (MASW) o ensayo MAM. También ensayos de laboratorio, no obstante, estos son menos usados para la obtención de este parámetro.

- Se recomienda estudiar el comportamiento dinámico con ISE considerando el método de la subestructura planteado en el FEMA 2091, para poder comparar los resultados con los obtenidos con el método empleado en la presente investigación que usa la metodología de elementos finitos.
- Para futuros trabajos relacionados al tema, se sugiere evaluar otros casos de estudio diferentes a los que se plantean, para complementar los resultados y el comportamiento de edificios considerando ISE. Se puede proponer nuevos modelos que incluya la variación de cantidad de pisos, otros sistemas estructurales, tipos de cimentaciones, entre otros.
- Para un cálculo aproximado y rápido de los desplazamientos considerando ISE, se pueden emplear los coeficientes hallados en la parte final del presente trabajo de investigación, tomando en cuenta que la estructura tenga características similares al edificio estudiado.
- Dado que esta investigación considera al suelo dentro del medio líneal-elástico, se recomienda ampliar el estudio de la ISE considerando la no linealidad del suelo, mediante el uso de acelerogramas con estudios de sitio y así representar mejor las propiedades dinámicas del suelo.

CAPÍTULO VIII. BIBLIOGRAFÍA

- American Society of Civil Engineers (2017). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*, ASCE 7-16. Virginia. Recuperado de <https://doi.org/10.1061/9780784414248>
- Abanto, R., Cisneros, L., Gómez, G., Díaz, C., & Rojas, P. (2020). Propuesta preliminar de método de análisis de interacción suelo-estructura para suelos peruanos.
- Avilés J. y Fernández L (2004). Efectos de interacción suelo-estructura en edificios con planta baja blanda. *Revista de Ingeniería Sísmica* N° 79, 71-90.
<https://www.redalyc.org/pdf/618/61807101.pdf>
- Braja M. (2013). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Séptima Edición. Editor: Cengage Learning Editores. Mexico D.F.
- Bran, J., González, R., & Ortiz, H. (2009). “Métodos de ensayo para la determinación de las principales propiedades dinámicas de los suelos de el salvador.”
- Chávez-García, F., & Montalva, G. A. (n.d.). Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway.
- Centro Nacional de Prevención de desastres (1999). *Curso sobre diseño y construcción sismorresistente de estructuras*. Primera Edición. Agencia de Cooperación Internacional del Japón. México.
- Cortez, O., & Sotomayor, M. (2007). Aplicación del método de elementos finitos y programas computacionales en el diseño estructural de un galpón para el taller de la empresa PROCOPET S.A.
- Crespo, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Quinta Edición. México: Editorial Limusa.

- Domínguez, M. (2014). Periodos de vibración de las edificaciones. Departamento de tecnología. Escuela de arquitectura. Universidad del Valle. Cali. *Revista arquitectura e ingeniería*. Vol 08, Numero 02, pp 1-13. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/1939/193932724001.pdf>
- Guanchez E. (2021). *Curso de Interacción suelo estructura [Diapositiva]*. Sismica Adiestramiento. Madrid.
- Federal Emergency Management Agency (2009). *Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures (FEMA P-750)*. National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP). Washington, D.C.
- Federal Emergency Management Agency (2020). *A Practical Guide to Soil-Structure Interaction P-2091*. Applied Technology Council (ATC). Washington, D.C. Recuperado de www.ATCCouncil.org
- Gaceta Oficial de la Ciudad de México (2017). Normas técnicas complementarias para diseño por sismo.
- Gaidhankar D., Pitamberwale Y., Kulkarni M., Shinde S (2021). *A Comparative Study of Construction Sequence with Conventional Analysis*. Turkish Journal of Computer and Mathematics Education Vol.12 No.13. Pune.
- González, J., & Samartín, A. (n.d.). Elementos finitos en suelos deformables.
- Kassimali A. (2010). *Structural Analysis*. Southern Illinois University, Carbondale. Cuarta Edición. Editor: Cengage Learning. Estados Unidos.
- León, J. (2011). Interacción estática suelo estructura análisis con el método de elementos finitos.
- Luna, R., & Jadi, H. (2000). Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods.
- Mejía, L. (2017). Interacción Dinámica Suelo-Estructura. <http://132.248.9.195/ptd2017/mayo/0759438/0759438.pdf>

- Meza, J., & Valderrama, C. (2014). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. "Influencia de la interacción suelo estructura".
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2009). Norma Técnica E.020 Cargas. Lima, Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE).
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018). Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente. Lima, Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE).
- Muñoz, A. (2018). Ingeniería Sismorresistente. Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de ciencias e ingeniería.
- Muñoz, A. (2020). Comentarios a la Norma Peruana E.030 Diseño Sismorresistente. SENCICO. Recuperado de https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1129512/COMENTARIOS_A_LA_NORMA_PERUANA_E.030_DISEÑO_SISMORRESISTENTE.pdf
- National Earthquake Hazards Reduction Program (2012). *Soil-Structure Interaction for Building Structures NIST GCR 12-917-21*. National Institute of Standards and Technology. California.
- Panigrahi S., Dr. Patil V., Madan S., Takkalaki S. (2021). Importance of Construction Sequence Analysis in design of High-Rise Building. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, Vol. 6.
- Pinto-Vega F. y Ledezma C. (2019). Interacción suelo-estructura en edificios de gran altura con subterráneos en Santiago, Chile. *Obras y Proyectos* 25, 66-75
- Ottazi G. (2016). *Apuntes del curso concreto armado I*. Decimoquinta Edición. Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de ciencias e ingeniería departamento de ingeniería. Lima.
- Ottosen, N. & Petterson, H. (1992). Introduction to finite elements methods. *A division of Simon & Schuster International Group*.

Rodríguez, A., & Villavicencio, S. (2021). *Análisis de los efectos de la interacción suelo-estructura en la dinámica estructural de un edificio de oficinas de 15 pisos. [Título profesional, Pontificia Universidad Católica del Perú]*. Repositorio institucional de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/20817>

Santana, A. (2010). Modelo Winkler para el Análisis de la Respuesta Dinámica de Estructuras Enterradas.

Santos, J. (1980). *Interacción estática suelo-estructura*. Modelos de suelos empleados. Revista de Obras Públicas, 181–191.

Soriano A. (1989). *Interacción suelo-estructura, Modificación del movimiento*. Madrid, España.

Vazquez, M., & Lopez, E. (2001). El método de los elementos finitos aplicado al análisis estructural.

Villarreal Castro, G. (2006a). *Interacción sísmica suelo-estructura*. www.gennervillarrealcastro.blogspot.com

Villarreal, G. (2006b). Análisis estructural.

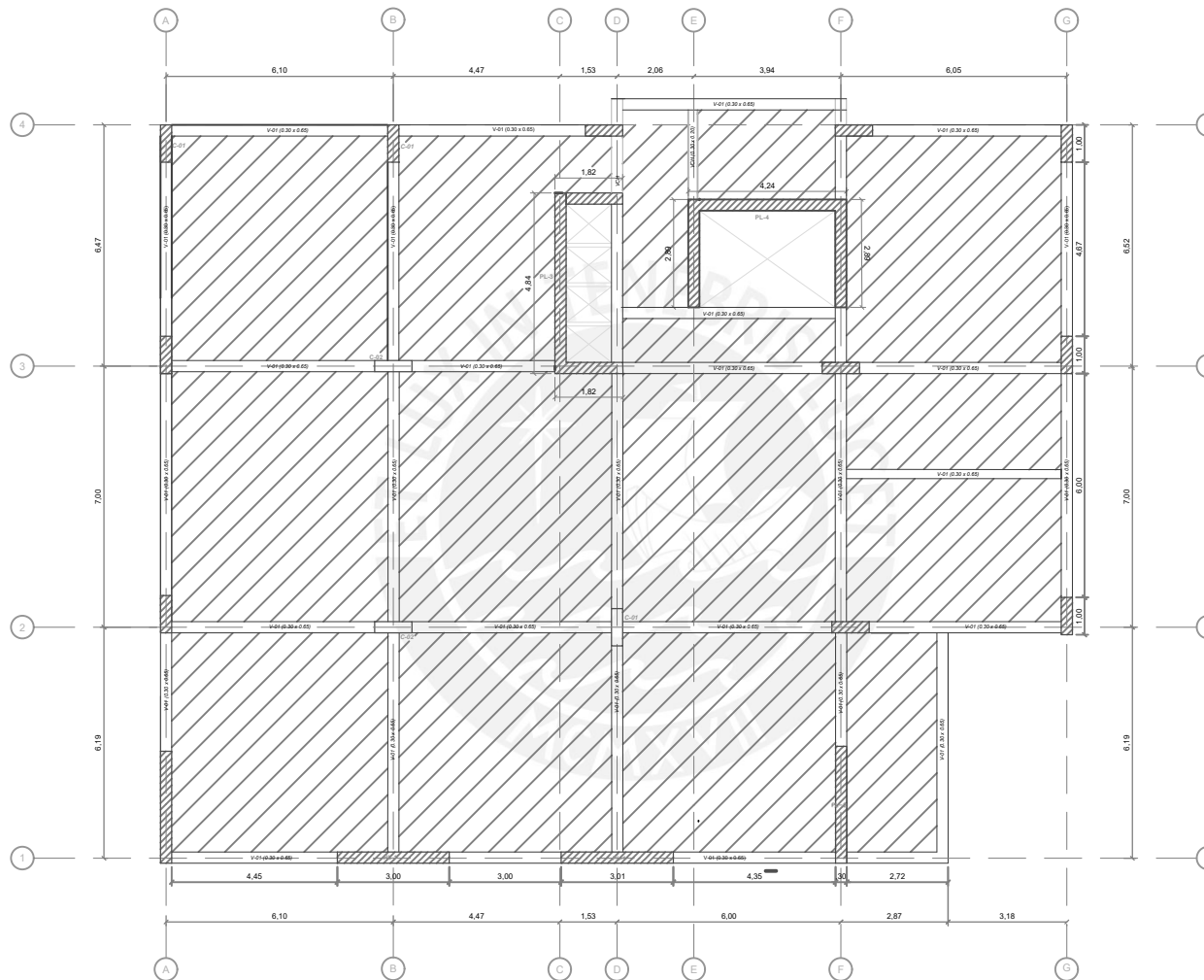
Villarreal, G. (2009a). Análisis de estructuras con el programa lira 9.0.

Villarreal, G. (2009b). Ingeniería sísmo-resistente prácticas y exámenes UPC.

Yépez, V. (2008). Asientos de cargas rectangulares en el semiespacio de Boussinesq. PoliBlogs.



ANEXO A



LEYENDA

	LOSA MACIZA h=0.20m
	VIGA PERALTADA
	VIGA CHATA
	C-1 0.30 x 1.00
	C-2 1.00 x 0.30
	f'c = 280 kg/cm ²
	f _y = 4200 kg/cm ²



INFLUENCIA DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA EN LA RESPUESTA SÍSMICA DE UN EDIFICIO DE OFICINAS DE 6 PISOS Y 2 SÓTANOS SOMETIDO A DIFERENTES TIPOS DE SUELOS.

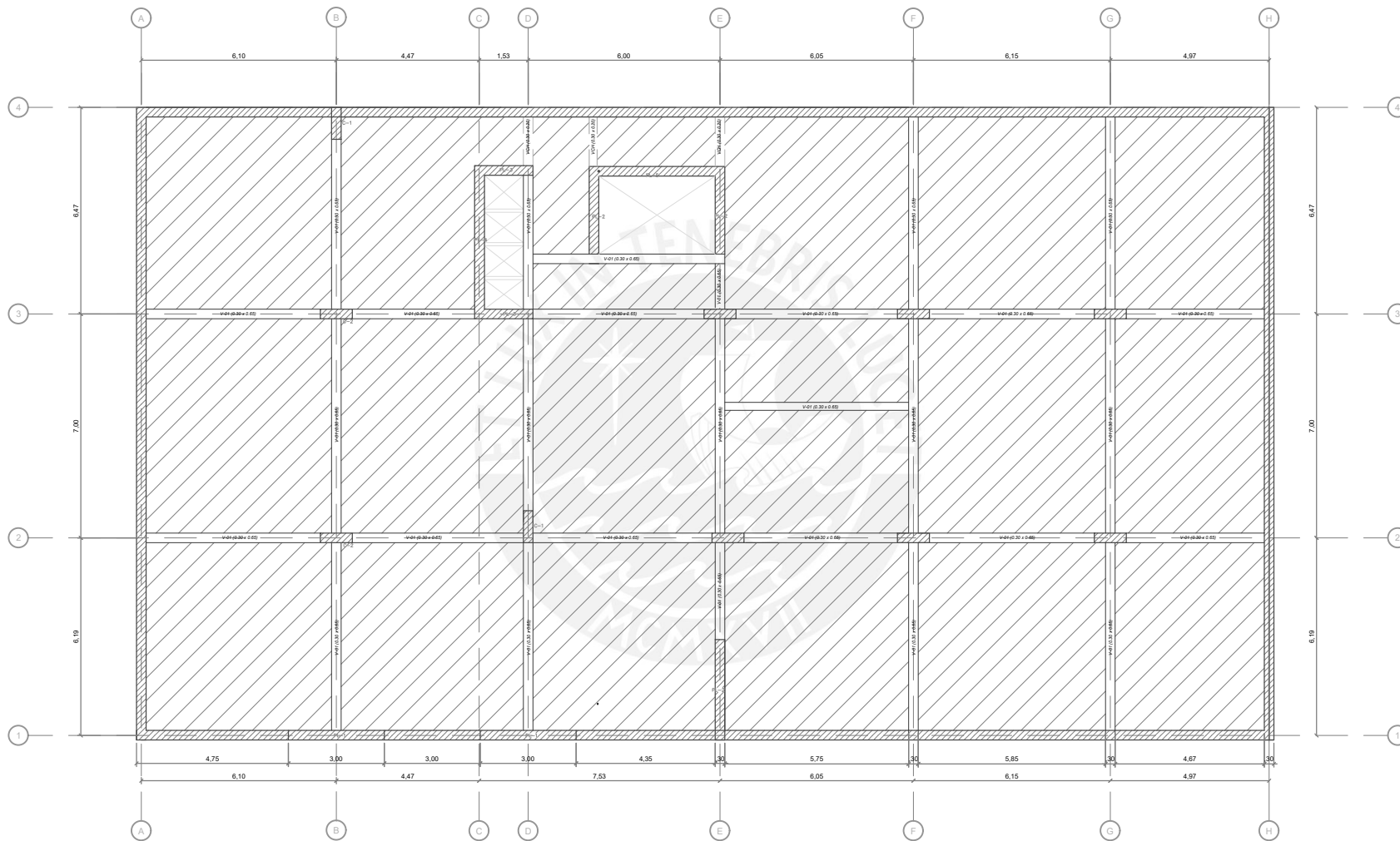
PISO: **PISO TÍPICO**

ALUMNO: PRADA CONDE, GREGIA CHILEL
MATEO SUAREZ, ISABEL THALÍA

ESCALA: 1/50

FECHA: JUNIO 2022

E-01



LEYENDA

LOSA MACIZA $h=0.20m$
 VIGA PERALTADA
 VIGA CHATA
 C-1 0.30×1.00
 C-2 1.00×0.30
 $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$
 $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$



INFLUENCIA DE LA INTERACCIÓN
 SUELO-ESTRUCTURA EN LA RESPUESTA SÍSMICA
 DE UN EDIFICIO DE OFICINAS DE 6 PISOS Y 2
 SÓTANOS SOMETIDO A DIFERENTES TIPOS DE
 SUELOS

PLANO: **PLANTAS S1, S2**

AUTOR: PRADA CONDE, GRIECA CHILRE
 MATEO SUAREZ, ISABEL THALÍA

ESCALA: 1:50 FECHA: JUNIO 2022

E-02