



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

“Evaluación del desempeño sísmico de un edificio de concreto armado considerando los efectos de la interacción suelo-estructura, Lima, 2021”

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

AUTOR:

Bravo Montoya, Henry Alván (ORCID: 0000-0003-3286-5466)

ASESOR:

Mg. Pinto Barrantes, Raúl Antonio (ORCID:0000-0002-9573-0182)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Diseño sísmico y estructural

Lima – Perú

2021

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres, HORI ALIA MONTOYA DIAZ y HUMBERTO BRAVO BAUTISTA por el apoyo y paciencia incondicional durante estos años para poder lograr ser un profesional de éxito.

AGRADECIMIENTO

Agradecer a Dios por haberme concedido la vida, y darme la fortaleza necesaria para enfrentar esta nueva etapa, siendo mi guía en cada momento.

A mis padres, HORI ALIA MONTOYA DIAZ, HUMBERTO BRAVO BAUTISTA por el apoyo y paciencia incondicional en la realización de esta nueva etapa.

A mis hermanas, MARTHA, MABEL y MILAGROS por su apoyo incondicional.

Índice de contenidos

	Pág.
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenidos	iv
Índice de tablas	v
Índice de figuras	vii
Resumen	ix
Abstract	x
Capítulo i: Introducción	1
Capítulo ii: Marco teórico	4
Capítulo iii: Metodología	43
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	43
3.2. Variables y operacionalización	45
3.3. Población, muestra y muestreo	46
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, valides y confiabilidad .	47
3.5. Procedimiento.....	49
3.6. Método de análisis de datos	49
3.7. Aspectos éticos	50
Capítulo iv: Resultados.....	51
Capítulo v: Discusión	69
Capítulo vi: Conclusiones	70
Capítulo vii: Recomendaciones	71
Referencias	72
Anexo	

Índice de tablas

Tabla 1: Valores típicos para los distintos perfiles de suelo.	11
Tabla 2: Valores de la velocidad de la onda de corte y la reducción del módulo de corte para varias clases de sitios y amplitudes de movimiento (ASCE, 2010; FEMA, 2009)	25
Tabla 3: Soluciones elásticas para la rigidez estática de cimentación rígida en la superficie del suelo.....	26
Tabla 4: Factores de corrección para la rigidez estática de zapatas rígidas	28
Tabla 5: Modificadores de rigidez dinámica para zapatas	29
Tabla 6: Modificadores de amortiguamiento para zapatas	30
Tabla 7: Niveles de sismo de diseño	32
Tabla 8: Matriz de objetivos de diseño.....	32
Tabla 9: Desplazamiento objetivo máximo para niveles de desempeño.....	33
Tabla 10: Valores para el factor de modificación C_0	41
Tabla 11: Prototipos de modelado y tipo de análisis.....	49
Tabla 12: Sondaje para clasificación del suelo	51
Tabla 13: características del suelo de fundación para el análisis en el software ETABS v.19.....	54
Tabla 14: factores sísmicos para en análisis software ETABS v.19	54
Tabla 15: Factor de reducción para el tipo de suelo de fundación.....	56
Tabla 16. Rigideces dinámicas sin amortiguamiento	58
Tabla 17. Rigideces dinámicas con amortiguamiento.....	58
Tabla 18. Periodo fundamental para modelos sin considerar la ISE y considerando la ISE.....	61
Tabla 19. Periodo fundamental de vibración.....	61
Tabla 20. Desplazamiento lateral en X-X.....	62
Tabla 21. Desplazamiento lateral en Y-Y.....	63

Tabla 22. Cortante en la base de cada nivel en dirección Y	64
Tabla 23. Cortante en la base de cada nivel en dirección Y	65
Tabla 24. Deriva de piso en cada nivel en dirección X	66
Tabla 25. Fuerza axial en la columna B-2.....	67
Tabla 26. Fuerza axial en la columna B-7	68

Índice de figuras

	Pág.
Figura 1: Ilustración esquemática de las deflexiones causadas por la fuerza aplicada a una estructura de base fija.....	13
Figura 2: Ilustración esquemática de las deflexiones causadas por la fuerza aplicada a una estructura con flexibilidad vertical, horizontal y rotacional en su base.	14
Figura 3: Gráfica de la relación de alargamiento del período (T/T) y amortiguamiento de la cimentación (β_f) versus la relación estructura-rigidez del suelo para cimentaciones cuadradas ($L = B$) y relaciones variables de h / B . En esta gráfica, $\nu = 0.33$, $B / L = 1.0$, amortiguación histerética del suelo $\beta_s = 0$, relación de masa $= 0.15$ y exponente $n = 2$	17
Figura 4: Ilustración de los efectos de la SSI inercial en la aceleración espectral (cortante de la base) asociada al alargamiento del periodo y al cambio de la amortiguación.....	21
Figura 5: Dimensiones de zapata para el cálculo de rigideces.....	26
Figura 6: Dimensiones de empotramiento para calcular Factores de corrección de empotramiento para la rigidez estática de las zapatas rígidas	27
Figura 7: Espectro de demanda y espectro de capacidad inicial.....	36
Figura 8: Representación bilineal del espectro de capacidad	37
Figura 9: Determinación del desplazamiento máximo estimado mediante iteración directa (FEMA-440, 2005).	38
Figura 10: Curva idealizada de fuerza-desplazamiento (ASCE/SEI 41-14, 2017).	39
Figura 11: detallado de secciones de columna	53
Figura 12: Especificaciones técnicas de los materiales de construcción.....	53
Figura 13: espectro de diseño en el eje x, según Norma E-030.....	55
Figura 14: espectro de diseño en el eje x, según Norma E-030.....	55

Figura 15. Definición de rigideces.	59
Figura 16. Asignación de rigideces en la cimentación.	60
Figura 17. Asignación de base fija al modelo A.	60
Figura 18. Periodo fundamental de vibración	61
Figura 19. Desplazamiento lateral en X-X	62
Figura 20. Desplazamiento lateral en Y-Y	63
Figura 21. Fuerza cortante en dirección X-X	64
Figura 22. Fuerza cortante en dirección Y-Y	65
Figura 23. Deriva en dirección X-X.	66
Figura 24. Fuerza axial en columna exterior B-2	67
Figura 25. Fuerza axial en columna exterior B-7	68

RESUMEN

La norma de diseño sismorresistente para cargas dinámicas contempla que un edificio se encuentra fijo en su base. Mientras que en la realidad el suelo de fundación se comporta como una base deformable, lo que permite un movimiento hasta cierto punto de la estructura debido a la capacidad de deformación, lo que disminuye la rigidez lateral del sistema.

Esta investigación tiene como objetivo determinar el efecto de la interacción suelo estructura en el comportamiento estructural de un edificio de concreto armado, Lima, 2021 en base a la norma americana NIST GCR 12-917-21. Se contemplan dos modelos, uno con base fija (Modelo A) y otro con base deformable (Modelo B).

El trabajo está estructurado en 7 capítulos. En el capítulo 1 se presenta la problemática de la investigación, además de los objetivos y la hipótesis. En el capítulo 2 se presenta el estado del arte donde se detalla las teorías de la interacción suelo-estructura y el comportamiento estructural. En el capítulo 3 se plasma la metodología empleada en la investigación. En el capítulo 4 se tiene los resultados, producto del análisis dinámico modal espectral. En el capítulo 5 se tiene las discusiones respecto a los resultados encontrados, contrastados con los antecedentes de la investigación, y, por último, en el capítulo 6 y 7 se tiene las conclusiones y recomendaciones.

PALABRAS CLAVE: interacción suelo-estructura, comportamiento estructural, funciones de impedancia, distorsiones de entrepiso.

ABSTRACT

The seismic-resistant design standard for dynamic loads contemplates that a building is fixed at its base. While in reality the foundation soil behaves as a deformable base, which allows a movement up to a certain point of the structure due to the deformation capacity, which decreases the lateral stiffness of the system.

This research aims to determine the effect of soil-structure interaction on the structural behavior of a reinforced concrete building, Lima, 2021 based on the American standard NIST GCR 12-917-21. Two models are considered, one with a fixed base (Model A) and the other with a deformable base (Model B).

The work is structured in 7 chapters. Chapter 1 presents the research problem, as well as the objectives and the hypothesis. Chapter 2 presents the state of the art, detailing the theories of soil-structure interaction and structural behavior. Chapter 3 presents the methodology used in the research. Chapter 4 presents the results of the spectral modal dynamic analysis. Chapter 5 contains the discussions regarding the results found, contrasted with the background of the research, and finally, Chapter 6 and 7 contain the conclusions and recommendations.

KEYWORDS: soil-structure interaction, structural behavior, impedance functions, inter-story drift.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Los sismos, son uno de los eventos naturales que mayor daño ocasionan en el mundo, tanto en la pérdida de vidas humanas como en la pérdida de bienes materiales, a lo largo de la historia se ha registrado múltiples sismos de gran magnitud, siendo el más catastrófico en cuanto a pérdida de vidas, el ocurrido en Haití en el año 2010.

A manera de mitigar o minimizar el efecto de los sismos, es que surge la ingeniería sísmica como rama de la ingeniería civil, que se interesa por la protección de vidas humanas y los recursos económicos ante la ocurrencia de sismos, limitando a los riesgos sísmicos a niveles socioeconómicos aceptables, con el paso de los años, la ingeniería sísmica ha ido asociando a especialistas de otras disciplinas tales como: sismólogos, ingenieros estructurales, ingenieros geotécnicos, arquitectos, etc.

Nuestro país, el Perú, se localiza en una de las zonas con la mayor acción sísmica del hemisferio, que a través del tiempo también ha sido escenario de grandes sismos, como lo fue el de Casma sucedido en el año 1970, dejando en escombros a la ciudad de Yungay, otro de los sismos más recientes, es el que se localizó en la provincia de Pisco, en el año 2007, dejando en las ruinas a la ciudad.

Si bien es cierto, se ha sumado esfuerzos a la hora de proyectar edificaciones para atenuar las pérdidas, tanto de vidas humanas, como en el tema económico, por consiguiente, podemos darnos cuenta del fracaso en el diseño de edificaciones, siendo imposible salvaguardar vidas, durante la ocurrencia de un sismo, esta cruda realidad hace que se busque mejorar el desempeño de las estructuras, ante la interacción con el suelo.

Pero respecto a la interacción que existe entre el suelo y la estructura, todavía es un tema poco estudiado en el Perú, tanto así que la Norma E.030 (2018) afirma que la consideración de efectos de la flexibilidad del sistema de cimentación es una alternativa y queda a juicio del ingeniero si lo considera pertinente su aplicación en el cálculo de la estructura (p. 13), sin embargo, no se establece parámetros para aplicar correctamente esos efectos.

Por otro lado, aparte de no considerarse la Interacción Suelo-Estructura (ISE), el diseño estructural está limitado a la zona elástica de los materiales, dado que no

existe una norma definida que indique como evaluar una estructura existente, más allá del rango elástico, ya que la norma E.030 de diseño sismorresistente solo está diseñada para el diseño por resistencia última.

Bajo esa premisa es que nace la idea de la evaluación por desempeño sísmico como alternativa para detectar las deficiencias o no de una estructura, teniendo en cuenta la interacción suelo estructura.

De esta manera, con base en lo antes descrito se plantea el **Problema general** de presente investigación y es, ¿Cuál es el efecto de la ISE en el desempeño sísmico de un edificio de concreto armado, Lima, 2021?, teniendo así **Problemas Específicos** que nacen a partir del problema general, los cuales son:

¿Cuál es el efecto de la ISE en la curva de capacidad de un edificio de concreto armado, Lima, 2021?, ¿Cuál es el efecto de la ISE en el punto de desempeño sísmico de un edificio de concreto armado, Lima, 2021?, y ¿Cuál será el desempeño y daño sísmico de un edificio de concreto armado debido a la influencia de la ISE, Lima, 2021?

Este estudio pretende ser el punto de partida para investigadores, es así que se presenta la **justificación técnica**, es decir, se basa en la escasa información técnica sobre estudios realizados en el Perú de los efectos de la ISE en el desempeño sísmico de un edificio, por tal motivo, en este estudio se plantea evaluar dos métodos: uno que no incluye efectos de la ISE (tradicional), donde se asume la fundación como suelo rígido, y el otro modelo considerando el efecto ISE. Esto permitirá a que los interesados en el diseño de estructuras o proyectistas consideren o no los resultados obtenidos en esta investigación, dado que este tipo de análisis conlleva a tener un resultado más prolijo y poder verificar el desempeño efectivo de la estructura en posibles casos de sismos de alta intensidad. Por otro lado, se tiene la **Justificación Económica**, que, según ejercicio profesional y consulta a diversos ingenieros estructurales, el costo para realizar el análisis sísmico de una edificación depende de la envergadura y magnitud del proyecto, llegando a costar desde el 1% hasta el 5% del E.T. hecho que hace que los ingenieros estructurales tomen diseños de otros proyectos, para no realizar el trabajo tedioso y poco remunerado. En esta investigación se ha elegido a este tipo de estudio, debido a que el Perú es una Zona altamente sísmica, por ende, siempre

se debe hacer hincapié en que las estructuras no fallen y se mantengan en servicio después de la ocurrencia del sismo. De no haberse considerado la interacción suelo-estructura en el desempeño sísmico, lo más probable es que el edificio colapse y las pérdidas económicas sean cuantiosas, de ahí parte esta investigación. La investigación también se argumenta mediante la **Justificación ambiental**, esto debido a que, al realizar este tipo de análisis, los edificios estarían menos propensos al colapso y no habría exposición de escombros como el concreto y/o ladrillo y no dementaría una nueva construcción reduciendo así el uso de la materia prima que sirve para la elaboración del concreto y el acero.

El **Objetivo general** al cual se pretende llegar es: evaluar la influencia de la ISE en el comportamiento estructural de un edificio de concreto armado, Lima, 2021, así mismo, **los objetivos** específicos son: determinar la influencia de la interacción suelo-estructura en el periodo fundamental de un edificio de concreto armado, Lima, 2021, determinar la influencia de la ISE en el desplazamiento lateral de un edificio de concreto armado, Lima, 2021, determinar la influencia de la interacción suelo-estructura, en la fuerza cortante de un edificio de concreto armado, Lima, 2021 y determinar la influencia de la interacción suelo-estructura, en la fuerza axial de columnas exteriores de un edificio de concreto armado, Lima, 2021.

Por otro lado, se ha planteado la **hipótesis general**: La ISE influye considerablemente en el desempeño sísmico de un edificio de concreto armado, Lima, 2021, las **hipótesis específicas**, que se infieren a partir de la general son: La interacción suelo-estructura aumenta el periodo de vibración de un edificio de concreto armado, Lima, 2021. El desplazamiento lateral de un edificio de concreto armado aumenta debido a la interacción suelo-estructura, Lima, 2021. La interacción suelo-estructura, aumenta la fuerza cortante en un edificio de concreto armado, Lima, 2021. La interacción suelo-estructura aumenta la fuerza axial de columnas exteriores un edificio de concreto armado, Lima, 2021.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

Curioso y Torres (2020), **objetivo**, Comparar respuestas obtenidas de la influencia de interacción suelo-estructura en edificaciones aporticadas (oficinas) de 4, 8 y 12 pisos en perfiles de suelo S1, S2 y S3 bajo la Normativa Americana NIST GCR 12-917-21. **Metodología**, para ello desarrolla la interacción dinámica suelo estructura ISE con y sin amortiguamiento la cual se aplica a 3 modelos a los que denomina modelo A, B y C con 4, 8 y 12 niveles. Los mismos que serán evaluados en tres tipos de suelo, es decir S1, S2 y S3. El análisis de la ISE lo realiza mediante las ecuaciones de la Norma Americana NIST GCR 12-917-21 Soil-Structure Interaction for Building Structures donde se evalúa la interacción inercial que se hace referencia a los desplazamientos y rotaciones en la fundación de la estructura (cimentación) debido a la respuesta de la estructura cuando sucede un sismo. Asimismo, la flexibilidad de la cimentación y el suelo son representados mediante 6 rigideces (3 de traslación y 3 de rotación) con y sin amortiguamiento. Para cada caso realiza una comparación del cortante en la base, momento, desplazamientos, derivas, periodos, frecuencias, modos de vibración, fuerzas internas máximas, y fuerzas internas en un pórtico definido con el fin de observar cómo se comporta la estructura para los tipos de suelo aplicados de cada modelo. Obteniendo los siguientes **Resultados**. Para el modelo A (4 pisos): con tipo de suelo S1 el desplazamiento máximo es de 0.94 cm (ISE), para un suelo tipo S2 el desplazamiento máximo es de 1.2 cm (ISE) y para un tipo de suelo S3 el desplazamiento máximo es de 1.9 cm (ISE) en la dirección X, para el caso de derivas obtiene los siguientes resultados: para el tipo de suelo S1 la deriva máxima es de 0.0013 (ISE), con S2 la deriva máxima es de 0.0018 (ISE) y para un tipo de suelo S3 la deriva máxima es de 0.0034 cm (ISE) en la dirección X. Para el modelo B (8 pisos): con tipo de suelo S1 el desplazamiento máximo es de 1.99 cm (IDSE), para un tipo de suelo S2 el desplazamiento máximo es de 3.2 cm (ISE) y para un tipo de suelo S3 el desplazamiento máximo es de 6.6 cm (ISE) en la dirección X, para el caso de derivas obtiene los siguientes resultados: para el tipo de suelo S1 la deriva máxima es de 0.0015 (ISE), con S2 la deriva máxima es de 0.0023 (ISE) y para un tipo de suelo S3 la deriva máxima es de 0.0040 cm (ISE) en la dirección X. Para el modelo C (12 pisos): con tipo de suelo S1 el desplazamiento máximo es

de 2.95 cm (ISE), para un tipo de suelo S2 el desplazamiento máximo es de 4.77 cm (ISE) y para un tipo de suelo S3 el desplazamiento máximo es de 10.33 cm (ISE) en la dirección X, para el caso de derivas obtiene los siguientes resultados: para el tipo de suelo S1 la deriva máxima es de 0.0011 (ISE), con S2 la deriva máxima es de 0.0017 (ISE) y para un tipo de suelo S3 la deriva máxima es de 0.0032 cm (ISE) en la dirección X. **Conclusiones:** para el modelo A: en el caso de desplazamiento en X se concluye que la variación es menor en los 3 tipos de suelo cuando se considera la ISE con amortiguamiento. Para el caso más desfavorable son: 0.45% en suelo S1, 8.74% en suelo S2 y 74.60% en suelo S3. Esto quiere decir, mientras más flexible sea el suelo las variaciones tienden a aumentar cuando se considera la ISE con y sin amortiguamiento, para el caso de derivas en dirección x-x concluye que la variación es menor en los 3 tipos de suelo cuando se considera la IDSE con amortiguamiento. Para el caso más desfavorables son: 0.68% en suelo S1, 11.29% en suelo S2 y 93.42% en suelo S3. Esto significa, mientras más flexible sea el suelo las variaciones tienden a aumentar cuando se considera la ISE con y sin amortiguamiento. Para en modelo B: para el caso de desplazamientos en X se concluye que la variación es menor en los 3 tipos de suelo cuando se considera la IDSE con amortiguamiento. Para el caso más desfavorable son: 0.27% para suelo S1, 2.79% para suelo S2 y 67.59% para suelo S3. Por otro lado, mientras más flexible sea el suelo las variaciones tienden a aumentar cuando se considera la ISE con y sin amortiguamiento, para el caso de derivas se concluye que la variación es menor en los 3 tipos de suelo cuando se considera la ISE con amortiguamiento. Para el caso más desfavorable son: 0.46% para suelo S1, 4.93% para suelo S2 y 85.13% para suelo S3. Esto indica, mientras más flexible sea el suelo las variaciones tienden a aumentar cuando se considera la ISE con y sin amortiguamiento. Para el modelo C: para el caso de desplazamientos en X la variación es menor en los 3 tipos de suelo cuando se considera la ISE con amortiguamiento. Para el caso más desfavorable son: 0.26% en suelo S1, 2.58% en suelo S2 y 24.48% en suelo S3. Por otro lado, mientras más flexible sea el suelo las variaciones tienden a aumentar cuando se considera la ISE con y sin amortiguamiento, para el caso de derivas la variación es menor en los 3 tipos de suelo cuando se considera la ISE con amortiguamiento. Para el caso más desfavorable son: 0.48% en suelo S1, 5.53% en suelo S2 y 46.74% en suelo S3.

Estos datos indican, mientras más flexible sea el suelo las variaciones tienden a aumentar cuando se considera la ISE con y sin amortiguamiento.

Ojeda (2021), tiene como **objetivo** aplicar el método del Análisis Dinámico Incremental para de esa manera evaluar el desempeño estructural de una edificación de concreto armado dual de siete niveles, de una edificación irregular ($\Delta=0.85R$), desarrollando la **metodología** siguiente: nivel de investigación, correlacional; diseño de investigación, documental; las técnicas de recopilación de datos que emplea para ello son: el Análisis Lineal Estático, el Análisis Dinámico Modal Espectral, el Análisis No Lineal Dinámico Tiempo Historia, Peligro Sísmico y el Análisis Dinámico Incremental. Los instrumentos que emplea para tal fin son: la norma E030 "Diseño Sismorresistente", E060 "Concreto Armado" y FEMA 451. Obteniendo los **resultados** siguientes: la distorsión máxima según el análisis dinámico modal espectral en $\Delta x=0.003$ y en $\Delta y=0.005$ ocurre en el quinto nivel. **Conclusión:** La demanda sísmica de la norma peruana exige un mayor desempeño en comparación demanda obtenida del cálculo de la demanda sísmica en la zona de interés. El desempeño sísmico de la estructura analizada se encuentra dentro del rango elástico y dentro del nivel de desempeño Totalmente Ocupacional para una demanda sísmica de servicio, El desempeño sísmico de la estructura analizada para el nivel de demanda de diseño se encuentra dentro del nivel de desempeño Prevención al Colapso para la dirección en "X" y para la dirección "Y" en el nivel de desempeño Resguardo de Vida.

Diaz y Diaz (2020), tienen como **objetivo** de su investigación, verificar si el bloque C del Hospital Regional de Lambayeque cumple con el nivel de desempeño sísmico requerido para una edificación esencial", siendo el edificio en mención, una edificación de 6 niveles más azotea con un sistema estructural de muros estructurales. **Resultados**, para ello la información adquirida de los planos fue procesada en el software Etabs 2017, realizando un análisis Push-Over, obteniendo así la curva de capacidad de la estructura, la misma que lo compara con los niveles de peligro sísmico BSE-1E y BSE-2E y sismo de diseño mediante metodología del FEMA y ASCE/SEI 41-13. **Conclusión:** El Bloque C del Hospital Regional de Lambayeque según la metodología FEMA 440 no cumple con los niveles de

desempeño sísmico requeridos en ambas direcciones “X e Y” para los tres niveles de peligro sísmico con los que se ha evaluado. El Bloque C del Hospital Regional de Lambayeque según la metodología ASCE/SEI 41-13 no cumple con los niveles de desempeño sísmico requeridos en ambas direcciones “X e Y” para los tres niveles de peligro sísmico con los que se ha evaluado.

Choque y Luque (2019), plantea dos prototipos para su estudio, para ello realizó dos modelos, el primero sistema aporticado y el segundo de placas (muros estructurales) con el **objetivo** de estudiar la respuesta frente a distintos modelos de amenaza sísmica. **Metodología**, Los prototipos realizados se establecen de acuerdo con la norma vigente, y realizando un análisis sísmico modal-espectral con el software ETABS. Posterior a ello, se diseñó los elementos estructurales como: vigas, columnas y placas. Una vez ya diseñado los elementos estructurales, se realiza el análisis Push-Over en el software ETABS, para determinar la curva de capacidad de la estructura, así como las rótulas plásticas, finalmente obtuvo el punto de desempeño del edificio según el método FEMA 440 y mediante el método del ASCE 41-13. **Conclusiones**, el mecanismo de colapso del edificio aporticado es como se esperaba, un mecanismo de falla dúctil con aparición de rótulas plásticas primero en las vigas y en menor medida en la base de las columnas. El principal aporte de rigidez lateral es proporcionado por las columnas, siendo el desplazamiento último antes del colapso en la dirección X de 39.43 cm y en la dirección Y de 33.79 cm; El mecanismo de colapso en el edificio estudiado de muros estructurales se da básicamente por una falla por flexión de los muros de corte interiores (P-2 y P-4) en la base, debido a que los principales esfuerzos por flexión durante el análisis Pushover se presentan en esta zona, principalmente en los elementos de borde, verificando así que el requisito de diseño por capacidad es de gran importancia para evitar la falla por corte, la cual es de naturaleza frágil. Para el sismo frecuente, el edificio con sistema de pórticos no cumple con el desempeño esperado debido a que irrumpe en el rango no lineal, aunque se encuentra levemente en el rango Operacional. Para el sismo de servicio presenta una respuesta esperada para el rango Operacional, lo mismo ocurre para el sismo de diseño estando en el rango de seguridad de vida, el desempeño es mejor al esperado para el sismo máximo para el rango seguridad de vida. El edificio de

muros estructurales para el sismo frecuente no cumple con el desempeño esperado debido a que irrumpe en el rango no lineal, pero levemente en el rango operacional. Para el sismo de servicio el desempeño es el adecuado, estando en el rango operacional, lo mismo ocurre con el sismo de diseño para el rango seguridad de vida; para el sismo máximo se tiene un mejor desempeño que el esperado en la dirección X para el rango de seguridad de vida; en la dirección Y se cumple con el objetivo mínimo de desempeño, dentro del rango de prevención de colapso, sin embargo, el margen respecto del punto de colapso no es muy amplio.

Oz et al. (2020), tuvo como **objetivo** investigar los efectos de la interacción suelo-estructura (SSI) en edificios de baja y mediana altura, **Metodología**, para ello seleccionó 40 edificios existentes y construyó modelos no lineales, con condiciones de base fija, para suelo del tipo: rígidos, moderados y blandos. Los edificios que se diseñaron con el código anterior a 1998 los agrupó como antiguos y nuevos respectivamente. Las condiciones de suelo se clasificaron según las velocidades de las ondas de corte utilizando el método de la subestructura. **Resultados**, La demanda de deformación inelástica las obtuvo mediante el análisis tiempo-historia en los que utilizó 20 registros de aceleración de sismos reales. **Conclusiones**: la interacción suelo estructura afecta de manera significativa en los casos de suelos blandos para los edificios antiguos, el aumento más significativo de demanda de deriva se aprecia en los primeros pisos, para los casos de base fija, rígida y moderada. La distribución de los resultados ha indicado que el efecto de ISE en el comportamiento sísmico de los edificios nuevos es limitado con respecto a los edificios antiguos.

Chaudhari y Chopade (2018), presenta el efecto de la interacción suelo-estructura en el comportamiento sísmico de la estructura y diseña un edificio con el **objetivo** de seguridad de vida. **Metodología**, considera para ello un edificio de seis plantas con y sin considerar la ISE. Se considera el edificio de RC de planta simétrica y altura total de 18 m, situado en la zona sísmica V, con cimentación poco profunda. Procedimiento: estos edificios se modelan, se diseñan de acuerdo con la norma IS 456:2000 y se analizan utilizando el software SAP2000 bajo dos condiciones de contorno diferentes, a saber, con base fija, y considerando la SSI, utilizó el análisis

dinámico no lineal con siete registros de tiempo-historia con propiedades de giro definidas por el usuario en la dirección X-Y. **Resultados**, en cuanto a la cimentación, realizó cuatro tipos de análisis de modelos: (1) modelo de base fija sin interacción suelo-estructura (Modelo NSSI), (2) Apoyo de zapata rígida sobre suelo duro considerando SSI (Modelo HSSI), (3) Apoyo de zapata rígida sobre suelo medio considerando SSI (Modelo MSSSI), (4) Apoyo de zapata rígida sobre suelo blando considerando SSI (Modelo SSSI). Finalmente realiza un estudio comparativo entre los modelos HSSI, MSSSI y SSSI con el modelo de base fija (NSSI). Consideró el promedio de siete respuestas máximas de la relación de deriva del piso, el corte del piso y el período natural. **Conclusiones**, encontró que la interacción suelo-estructura puede alterar el comportamiento sísmico del edificio en términos de demandas de fuerzas sísmicas y deformaciones.

Medina y Music (2018), el Autor plantea como **objetivo**, determinar el desempeño sísmico usando el método de espectro de capacidad. Para ello, realiza la siguiente **Metodología**, se obtiene el espectro de capacidad a partir de la curva de capacidad del edificio, para ello, se consideran patrones de carga. Los espectros de demanda se obtienen a partir de registros de sismo que provienen de estudios de riesgo sísmico de edificios de Chile. **Resultados**, se considera dos maneras para determinar el espectro de desplazamiento elástico: una según DS61 y la otra según ATC y FEMA, luego, a partir de los puntos de desempeño es que se obtiene: constante, esfuerzos, desplazamiento objetivo (desplazamiento de techo/altura del edificio), para compararlos con VISIÓN 20020.

Conclusión, que para todos los puntos de desempeño el edificio analizado cumple, que el desplazamiento objetivo está acorde con los límites que establece Visión 2000.

Ali, Faraj y Mohammed (2019), **Objetivo**. Medir el grado de seguridad de respuesta de las estructuras a las cargas sísmicas. Para que las edificaciones se encuentren bajo una circunstancia más realista, es fundamental considerar el efecto de ISE en el análisis de la edificación sometida a cargas sísmicas. **Metodología**, para ello, eligen tres muestras de edificios típicos con seis, ocho y diez pisos con y sin el efecto de SSI utilizando tanto el método estático equivalente como el análisis de

espectro de respuesta dinámica. **Resultados**, para cada método, se examinan las cinco categorías de suelo diferentes (SA, SB, SC, SD, SE) para ilustrar el efecto del suelo de cimentación en los edificios sometidos a una carga sísmica. **Conclusión**, no se pueden observar modificaciones en la cimentación de roca con o sin la consideración de ISE. De lo contrario, el efecto sobre ISE puede incrementar el desplazamiento en suelos de baja rigidez, particularmente el tipo de suelo (SE). De manera similar, el período natural de los edificios aumenta significativamente al disminuir la rigidez del suelo.

Hokmabadi y Fatahi (2015) mencionan que, al seleccionar el tipo de cimentación más adecuada para edificios de mediana altura en zonas sísmicas de alto riesgo, los ingenieros de diseño pueden considerar que una cimentación poco profunda, una cimentación de pilotes o una cimentación de balsa pueden soportar mejor las cargas estáticas y dinámicas. Sin embargo, los diferentes tipos de cimientos se comportan de manera diferente durante los terremotos, dependiendo de la ISE donde las propiedades del suelo *in situ* y el tipo de cimentación cambian las características dinámicas (frecuencia natural y amortiguación) del sistema suelo-cimentación-estructura. **Objetivo**, investigar las diferentes características de ISE y su influencia en la respuesta sísmica de los marcos de los edificios, **Metodología**, se simuló un modelo numérico 3D de una estructura (prototipo) a escala real de 15 pisos con cuatro tipos diferentes de cimentaciones: (i) Una -estructura que excluye el SSI, (ii) una estructura sostenida por una cimentación poco profunda, (iii) una estructura sostenida por una cimentación de balsa de pilotes en suelo blando y (iv) una estructura sostenida por una cimentación de pilotes flotantes (friccionales) en suelo blando. **Resultados**, luego se realizaron análisis de elementos finitos con FLAC3D utilizando registros de terremotos reales que incorporaron no linealidades materiales (suelo y superestructura) y geométricas (elevación, separación y P- Δ). El procedimiento de modelado numérico 3D se había verificado previamente con pruebas experimentales de mesa vibratoria realizadas por los autores. **Conclusión**, el tipo de cimentación contribuye de manera importante a la respuesta sísmica de los edificios con ISE y, por lo tanto, se debe prestar una atención cuidadosa para garantizar un diseño seguro y rentable.

En cuanto al estado de arte, se tiene, los siguientes conceptos.

Interacción suelo-estructura, En el cálculo convencional de edificios, se emplean apoyos con base rígida en el análisis estructural, asumiendo así, una rigidez infinita del suelo de fundación, reduciendo así los esfuerzos de entrada de un sismo, hecho que se traduce en que el periodo de vibración de la estructura es menor al real Morales L. y Espinosa A, (2020).

La interacción suelo-estructura por otro lado considera una base flexible, generándose así esfuerzos de entrada de un sismo más reales, por lo, que existe una alteración en el movimiento del suelo de fundación debido a la presencia de la estructura. Chaudhari y Chopade (2018)

Para casos simplificados es que se modela a la cimentación como un empotramiento perfecto y se considera un suelo rígido, la norma E.030 Diseño sismorresistente (2018) establece que un suelo es rígido dependiendo de \bar{V}_s y la clasificación se propone en la tabla 1.

Tabla 1: Valores típicos para los distintos perfiles de suelo.

Tabla N° 2 CLASIFICACIÓN DE LOS PERFILES DE SUELO			
Perfil	\bar{V}_s	\bar{N}_{60}	\bar{S}_u
S ₀	> 1500 m/s	-	-
S ₁	500 m/s a 1500 m/s	> 50	>100 kPa
S ₂	180 m/s a 500 m/s	15 a 50	50 kPa a 100 kPa
S ₃	< 180 m/s	< 15	25 kPa a 50 kPa
S ₄	Clasificación basada en el EMS		

Fuente: Norma técnica E.030.

Para suelos blandos (S₃) y suelos de condiciones excepcionales (S₄) conlleva a un error el modelar a la cimentación como empotramiento perfecto, esto porque los

valores del módulo de corte máximo ($G_{m\acute{a}x}$) y módulo de corte secante (G_{sec}) con pequeños. Estos valores se pueden estimar de la siguiente manera.

$$G_{m\acute{a}x} = \frac{\rho V_s^2}{g} \quad (2-1)$$

$$G_{m\acute{a}x} = \frac{G}{G_{m\acute{a}x}} G_{m\acute{a}x} \quad (2-2)$$

Dónde:

ρ : densidad del suelo

V_s : velocidad de onda de corte

G : módulo de corte equivalente

Interacción inercial según NIST GCR-12-917.21, se refiere a los desplazamientos y rotaciones que ocurren en la cimentación de la estructura resultado de las fuerzas impulsadas por la inercia, como el momento y el cortante de la base. Los desplazamientos y rotaciones pueden ser una fuente significativa de flexibilidad y disipación de energía en el sistema suelo-estructura.

La NIST GCR-12-917-21 muestra como el sistema suelo-estructura se puede representar en un sistema un solo grado de libertad, pero que puede extrapolarse a sistemas de varios grados de libertad con un primer modo dominante.

Comportamiento del sistema suelo-estructura, se considera una estructura de un solo grado de libertad con rigidez, k , y masa, m , que descansa sobre una base fija, como se muestra en la Figura 1. Una fuerza estática, F , provoca una deformación, Δ :

$$\Delta = \frac{F}{k} \quad (2-3)$$

A partir de la dinámica estructural, la frecuencia de vibración natural no amortiguada, ω , y el periodo, T , de la estructura vienen dados por Clough y Penzien (1993) como:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2-4)$$

Sustituyendo en la ecuación anterior, se obtiene una expresión para el cuadrado del periodo como:

$$T^2 = (2\pi)^2 \frac{m}{F/\Delta} = (2\pi)^2 \frac{m\Delta}{F} \quad (2-5)$$

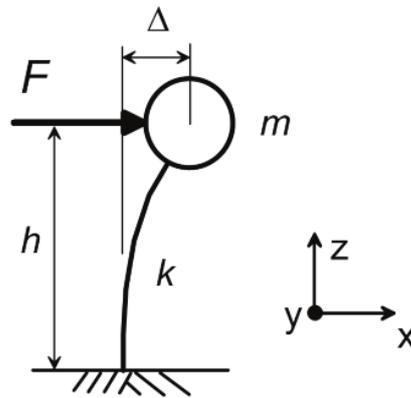


Figura 1: Ilustración esquemática de las deflexiones causadas por la fuerza aplicada a una estructura de base fija.

Fuente: NIST GCR 12-917-21.

Consideremos ahora la misma estructura con resortes verticales, horizontales y rotativos en su base, representando los efectos de la flexibilidad del suelo contra una cimentación rígida, como se representa en la figura 2. La rigidez del resorte vertical en la dirección z se denota k_z y la rigidez del resorte horizontal en la dirección x se denota k_x y el resorte de rotación se denomina k_{yy} que representa la rotación en el plano $x - z$ (alrededor del eje $y - y$). Si se aplica una fuerza, F en la dirección x , la estructura se desvía, al igual que en el sistema de base fija, pero el cortante de la base (F) desvía el resorte horizontal en u_f y el momento (Fxh) de la base desvía el resorte giratorio en θ . En consecuencia, la deflexión total con respecto al campo libre en la parte superior de la estructura, $\tilde{\Delta}$, es:

$$\tilde{\Delta} = \frac{F}{k} + u_f + \theta h \quad (2-6)$$

$$\tilde{\Delta} = \frac{F}{k} + \frac{F}{k_x} + \left(\frac{Fh}{k_{yy}} \right)$$

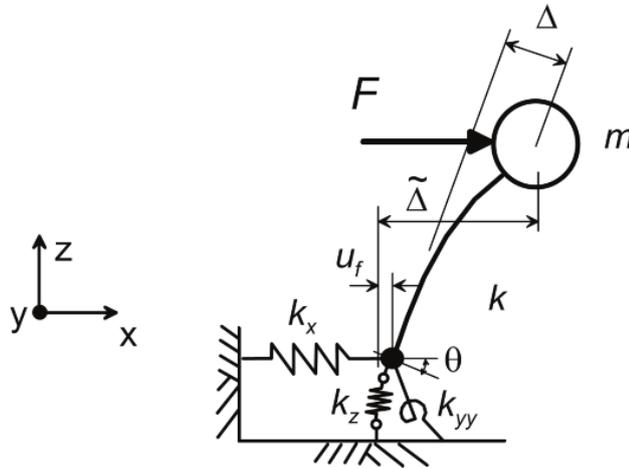


Figura 2: Ilustración esquemática de las deflexiones causadas por la fuerza aplicada a una estructura con flexibilidad vertical, horizontal y rotacional en su base.

Fuente: NIST GCR 12-917-21.

Sustituyendo la ecuación 2-4 en la ecuación 2-3, se obtiene una expresión para el periodo de base flexible, \tilde{T} , como:

$$\tilde{T}^2 = (2\pi)^2 \frac{m\tilde{\Delta}}{F} = (2\pi)^2 m \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k_x} + \frac{1}{k_{yy}} \right) \quad (2-7)$$

Combinando expresiones en la ecuación 2-5 y ecuación 2-2 resulta la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{\tilde{T}}{T} \right)^2 = \frac{k}{m} m \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k_x} + \frac{h^2}{k_{yy}} \right) \quad (2-8)$$

La ecuación 2-6 se simplifica en una expresión clásica de alargamiento del periodo como:

$$\left(\frac{\tilde{T}}{T}\right)^2 = \sqrt{1 + \frac{k}{k_x} + \frac{kh^2}{k_{yy}}} \quad (2-9)$$

La ecuación 2-7 puede aplicarse a estructuras de varios grados de libertad tomando la altura, h , como la altura del centro de masa para la forma de primer modo. Esto se conoce comúnmente como la altura modal efectiva, que es aproximadamente dos tercios de la altura total de la estructura, y se toma como 0,7 veces la altura en ASCE/SEI 7-10 (ASCE, 2010). En estos casos, el alargamiento del período se aplica sólo al período del primer modo. En trabajos anteriores de Veletsos y Nair (1975) y Bielak (1975), se ha demostrado que los parámetros adimensionales que controlan el alargamiento del periodo son:

$$\frac{h}{V_s T}, \frac{h}{B}, \frac{B}{L}, \frac{m}{\rho_s 4BLh}, \nu \quad (2-10)$$

Donde h es la altura de la estructura (o la altura hasta el centro de masa de la primera forma modal), B y L se refieren a la media anchura y la media longitud de la cimentación, m es la masa (o la masa modal efectiva), ρ_s , es la densidad de la masa del suelo y ν es la relación de Poisson del suelo. El trabajo anterior era aplicable a cimientos circulares, y se ha adaptado aquí para formas rectangulares considerando la relación, B/L . En la medida en que h/T cuantifica la rigidez de la superestructura, el término $h/(V_s T)$ en la ecuación 2-8 representa la relación de rigidez suelo-estructura. El término h/T tiene unidades de velocidad, y será mayor para los sistemas rígidos de resistencia a fuerzas laterales, como los muros de corte, y menor para los sistemas flexibles, como los pórticos a momento. La velocidad de la onda de corte, V_s , está estrechamente relacionada con el módulo de corte del suelo, G , calculado como:

$$V_s = \sqrt{G/\rho_s} \quad (2-11)$$

Para las estructuras típicas de los edificios en suelos y rocas meteorizadas, $h/(V_s T)$ es inferior a 0,1 para las estructuras aportricadas a momento, y entre 0.1 y 0.5

aproximadamente para las estructuras de muros de corte y pórticos arriostrados (Stewart et al., 1999b). El alargamiento del período aumenta notablemente con la relación de rigidez entre la estructura y el suelo, que es el parámetro más importante que controla los efectos inerciales de la ISE.

La relación entre la altura de la estructura y el ancho de la cimentación, h/B , y la relación entre el ancho y la longitud de la cimentación, B/L , en la ecuación 2-8 son relaciones de aspecto que describen la geometría del sistema suelo-estructura. La relación de masa, $m/\rho_s 4BLh$, es la relación entre la masa de la estructura y la masa del suelo en un volumen que se extiende hasta una profundidad igual a la altura de la estructura, h , por debajo de los cimientos. En la ecuación 2-7, se puede ver que el alargamiento del periodo no tiene una dependencia fundamental de la masa. El término de relación de masas se introdujo para que el alargamiento del periodo pudiera relacionarse con características fácilmente reconocibles como el periodo del primer modo estructural, T , y la velocidad de la onda de corte del suelo, V_s en lugar de la rigidez estructural, k , y el módulo de corte del suelo, G . El efecto de la relación de masas es modesto, y se suele tomar como 0,15 (Veletsos y Meek, 1974). La relación de Poisson del suelo, ν , afecta la rigidez y las características de amortiguación de la cimentación.

Utilizando modelos para la rigidez de cimentaciones rectangulares (de medio ancho, B ; medio largo, L ; y $L \geq B$) que descansan sobre un medio-espacio isotrópico homogéneo con velocidad de onda de corte, V_s , las relaciones de alargamiento del período se pueden calcular con los resultados que se muestran en Figura 3, que se traza para el caso especial de una zapata cuadrada ($L = B$).

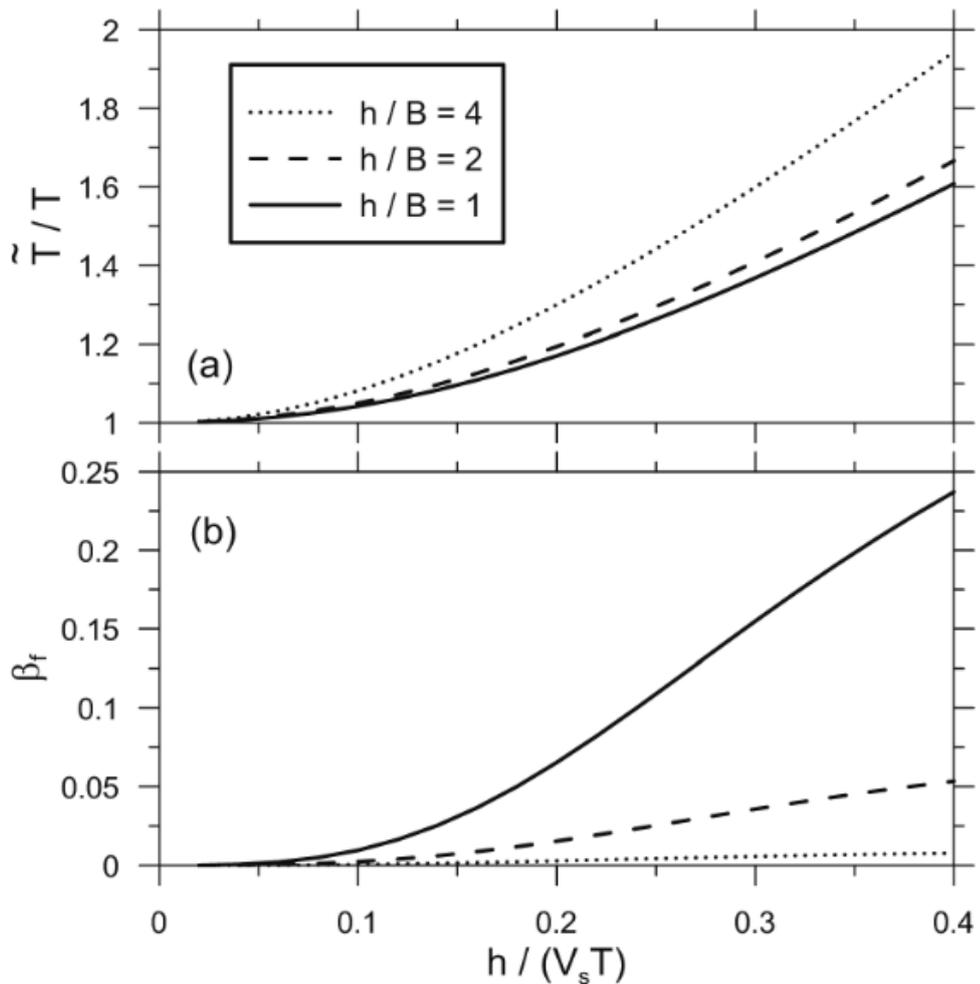


Figura 3: Gráfica de la relación de alargamiento del período (\tilde{T}/T) y amortiguamiento de la cimentación (β_f) versus la relación estructura-rigidez del suelo para cimentaciones cuadradas ($L = B$) y relaciones variables de h/B . En esta gráfica, $\nu = 0.33$, $B/L = 1.0$, amortiguación histerética del suelo $\beta_s = 0$, relación de masa = 0.15 y exponente $n = 2$.

A igualdad de otros factores, el alargamiento del periodo aumenta con la relación entre la altura de la estructura y el ancho de la cimentación, h/B , debido al aumento del momento de volteo y la rotación de la cimentación, θ . Esto implica que los efectos inerciales de la ISE serían más significativos en los edificios altos. Los edificios altos suelen tener una relación $h/(V_s T)$ baja, que es más importante para controlar los efectos de la ISE inercial. Por lo tanto, el alargamiento del periodo en los edificios altos se aproxima a la unidad (es decir, poco o ningún alargamiento del periodo). Para una relación fija de h/B , se observa que el alargamiento del periodo disminuye modestamente con la relación entre el ancho y la longitud de la

cimentación, B/L , debido al aumento del tamaño de la cimentación (y por tanto rigidez) normal a la dirección de la carga.

Además del alargamiento del periodo, el comportamiento del sistema también se ve afectado por el amortiguamiento asociado a la interacción suelo-cimentación, denominado amortiguamiento de la cimentación, β_f . Este amortiguamiento se compone de dos partes: (1) las contribuciones de la histéresis del suelo (amortiguación histerética); y (2) la radiación de energía, en forma de ondas de tensión, desde la cimentación (amortiguación por radiación). El amortiguamiento de la cimentación contribuye directamente al amortiguamiento del sistema de base flexible.

$$\beta_0 = \beta_0 + \frac{1}{(\bar{T}/T)^n} \beta_i \quad (2-12)$$

Donde es el amortiguamiento estructural en la superestructura asumiendo una base fija, que generalmente se toma como 5% para sistemas estructurales típicos. Es posible realizar estimaciones más precisas de β_i en función del tipo y la configuración del sistema estructural, como se describe en PEER/ATC-72-1, Modeling and Acceptance Criteria for Seismic Design and Analysis of Tall Buildings (ATC, 2010). Las observaciones de los estudios de casos (Stewart et al., 1999b) han demostrado que oscila entre aproximadamente el 0% y el 25%. El exponente, n , en el término de alargamiento del periodo β_i en la Ecuación 2-10 se toma como 3 para el amortiguamiento estructural linealmente viscoso, y 2 en caso contrario (por ejemplo, para el amortiguamiento histerético) (Givens, 2013).

Los modelos analíticos para el amortiguamiento de la cimentación han sido presentados por Veletsos y Nair (1975), Bielak (1975 y 1976), Roesset (1980), Wolf (1985), Avilés y Pérez-Rocha (1996), Maravas et al. (2007), y Givens (2013), entre otros. La solución clásica de Veletsos y Nair tiene en cuenta la dependencia de la frecuencia de los términos de amortiguación de los cimientos. Asume que el amortiguamiento estructural es puramente viscoso, y se aplica para una cimentación circular que descansa sobre un medio espacio. La ecuación β_f proporcionada por Veletsos y otros es de valor complejo (es decir, compuesta por valores reales e imaginarios), lo que complica la interpretación de su significado

físico. El trabajo de Bielak utiliza las mismas condiciones, salvo que se supone que la cimentación es un cilindro que penetra en un medio espacio a una profundidad de empotramiento, D , y las expresiones resultantes son de valor real. El valor del exponente n en la ecuación 2-10 se toma como 3 para las soluciones de Veletsos y Bielak porque se supone que el amortiguamiento estructural es viscoso.

El procedimiento dado por Wolf (1985) desprecia la dependencia de la frecuencia de los términos de rigidez de la cimentación, y asume que el amortiguamiento de la radiación de la cimentación es linealmente viscoso (es decir, coeficientes constantes de amortiguación para la traslación y la rotación, $(c_x$ y $c_{yy})$), y se aplica para una cimentación circular que descansa sobre un medio espacio. Teniendo en cuenta la dependencia de la frecuencia, la forma de la expresión de amortiguación de Wolf (similar a la de Roesset, 1980) puede reescribirse como:

$$\beta_f = \left(\frac{(\tilde{T}/T)^{n_s} - 1}{(\tilde{T}/T)^{n_s}} \right) \beta_s + \frac{1}{(\tilde{T}/T_x)^{n_x}} \beta_x + \frac{1}{(\tilde{T}/T_{yy})^{n_{yy}}} \beta_{yy} \quad (2-13)$$

Donde β_s es la amortiguación histerética del suelo, β_x y β_{yy} son relaciones de amortiguación relacionadas con la amortiguación por radiación de los modos traslacional y rotacional (descritos más adelante en la Sección 2.2), y T_x y T_{yy} son periodos de vibración ficticios, calculados como si la única fuente de la vibración fue traslación o rotación de la base, como sigue:

$$T_x = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_s}} \quad T_{yy} = 2\pi \sqrt{\frac{mh^2}{k_{yy}}} \quad (2-14)$$

Los exponentes n_s , n_x y n_{yy} dependen de la forma específica de amortiguación asociada a los respectivos componentes del amortiguamiento de la cimentación, y todos los demás términos son los definidos anteriormente. Sin embargo, dado que no se espera que ninguno de estos términos sea linealmente viscoso, se recomienda tomar estos exponentes como 2 (Givens, 2013). Obsérvese que para $n = n_s$, los términos de alargamiento del periodo delante del término de la ecuación 2-10 y el término si de la ecuación 2-11 son factores de peso que juntos suman la unidad. En consecuencia, la ecuación 2-11 puede considerarse como una "regla de

mezcla" para la amortiguación en diferentes modos y fuentes de vibración. Dado que los resultados de Wolf se produjeron sin tener en cuenta la dependencia de la frecuencia de los términos de rigidez de la cimentación, la ecuación 2-11 puede proporcionar resultados más precisos si esos efectos se incluyen en el cálculo del alargamiento del período.

El amortiguamiento hysterético del suelo, s , depende de la deformación, y normalmente puede evaluarse a partir de la información de la literatura. Los modelos clásicos se resumen en Kramer (1996). Los modelos empíricos más contemporáneos de Darendeli (2001) y Menq (2003) tienen en cuenta la presión de sobrecarga y la deformación por cizallamiento de manera coherente en múltiples tipos de suelo.

La solución de Wolf para el amortiguamiento de la cimentación en la ecuación 2-11, junto con las soluciones clásicas de Veletsos, Bielak y Roesset, desestiman las contribuciones de los términos que implican el producto de dos relaciones de amortiguamiento. Maravas et al. (2007) presentan soluciones exactas en las que se incluyen esos términos. Al igual que Wolf, Maravas et al. (2007) utiliza el amortiguamiento hysterético de modo que los exponentes $n = 2$, y si se excluyen los términos que implican el producto de dos relaciones de amortiguamiento, se recupera la ecuación 2-11.

Al igual que en el caso del alargamiento del periodo mostrado en la Figura 3-a, la Figura 3-b muestra que el amortiguamiento de la cimentación aumenta fuertemente con la relación de rigidez estructura-suelo, $h/(V_s T)$. En la Figura 3-b, todos los exponentes se tomaron como 2. El amortiguamiento disminuye con valores crecientes del balanceo de la cimentación (que domina a altas relaciones h/B). Los términos de amortiguación por radiación (β_x y β_{yy}) se reducen significativamente cuando se encuentra una capa rígida de roca madre a profundidades moderadas o poco profundas, como se describe más adelante.

Se han validado procedimientos de análisis para \tilde{T}/T y β_f similares a los descritos anteriormente en relación con las observaciones de edificios instrumentados sacudidos por terremotos (Stewart et al., 1999a; 1999b). Estos estudios muestran que el parámetro más importante que controla la importancia de la interacción inercial es $h/(V_s T)$, y que los efectos de la ISE inercial son generalmente

insignificantes para $h/(V_s T) < 0.1$, lo que ocurre en estructuras flexibles (por ejemplo, edificios de pórticos a momento) situados en suelo o roca competente. Por el contrario, los efectos de la ISE inercial tienden a ser significativos para las estructuras rígidas, como los edificios de muros de corte o de pórticos arriostrados, situados en suelos más blandos.

El efecto de la ISE inercial en el esfuerzo cortante de la base de un edificio se ilustra en la Figura 4. Debido a que el esfuerzo cortante en la base para la respuesta elástica se calcula comúnmente sobre la base de la aceleración pseudoespectral en el primer modo, la figura representa la variación de la aceleración pseudoespectral en función del período tanto en escala lineal como logarítmica. La aceleración pseudoespectral para una estructura de base flexible, \tilde{S}_a , se obtiene introduciendo el espectro dibujado para la relación de amortiguación efectiva, β_0 , en el correspondiente período alargado, \tilde{T} .

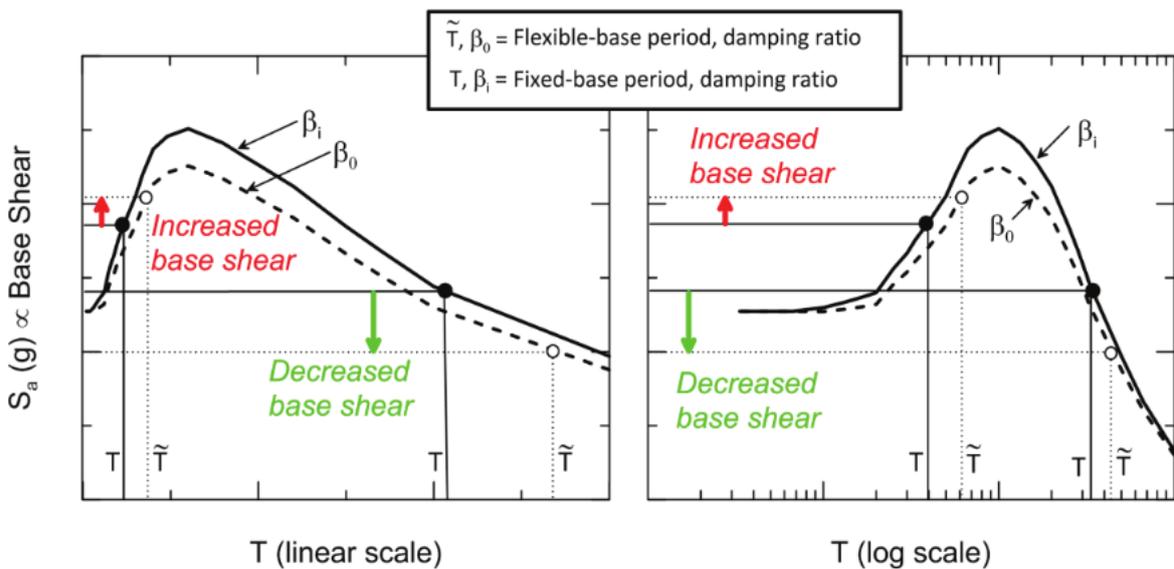


Figura 4: Ilustración de los efectos de la SSI inercial en la aceleración espectral (cortante de la base) asociada al alargamiento del período y al cambio de la amortiguación.

El efecto de la ISE en el cortante de la base está relacionado con la pendiente del espectro. El cortante de la base tiende a aumentar cuando la pendiente es positiva y a disminuir cuando la pendiente es negativa.

Para el caso común de edificios con períodos relativamente largos en la porción descendente del espectro, el uso de \tilde{S}_a (base flexible) en lugar de S_a (base fija)

típicamente resulta en una demanda de cortante en la base reducida. Por el contrario, el ISE inercial puede aumentar el cortante de la base en estructuras de período relativamente corto.

El período en el que se produce el pico espectral, denominado período predominante del movimiento del suelo, T_p , suele estar controlado por el régimen tectónico, la magnitud del terremoto y la distancia entre el lugar y la fuente (Rathje et al., 2004), y sólo coincidirá con el período del lugar en ciertos casos que impliquen grandes contrastes de impedancia debido a la estratificación del suelo. En ausencia de efectos inusuales en el lugar, los valores típicos de T_p , oscilan entre aproximadamente 0,2 y 0,5 segundos para los terremotos de la corteza terrestre poco profunda en regiones tectónicamente activas, como California.

Ecuaciones de rigidez y amortiguamiento de cimentaciones poco profundas, las funciones de impedancia representan las características de rigidez y amortiguación dependientes de la frecuencia de la interacción suelo-cimentación. Las soluciones clásicas para la función de impedancia de valores complejos pueden escribirse como (Luco y Westman, 1971; Veletsos y Wei, 1971):

$$\bar{k}_j = k_j + i\omega c_j \quad (2-15)$$

donde \bar{k}_j denota la función de impedancia de valor complejo; j es un índice que denota los modos de desplazamiento o rotación traslacional; k_j y c_j denotan los coeficientes de rigidez de la cimentación y del amortiguador que dependen de la frecuencia, respectivamente, para el modo j ; ω es la frecuencia circular (rad/s). Un amortiguador con el coeficiente c_j representa los efectos de la amortiguación asociada a la interacción entre el suelo y la cimentación. Una forma alternativa para la Ecuación 2-13 es:

$$\bar{k}_j = k_j(1 + 2i\beta_j) \quad (2-16)$$

Dónde:

$$\beta_j = \frac{\omega c_j}{2k_j} \text{ (definido para } k_j > 0) \quad (2-17)$$

Una ventaja de la expresión para β_j en términos de c_j en la Ecuación 2-15 es que, en la resonancia del sistema ISE, puede interpretarse como una fracción del amortiguamiento crítico en el sentido clásico (Clough y Penzien, 1993). Un inconveniente de la ecuación 2-15 es que, a medida que k_j se aproxima a cero, β_j va al infinito. La parte imaginaria de la impedancia compleja representa una diferencia de fase entre la excitación armónica y la respuesta a una frecuencia determinada. La diferencia de fase, ϕ_j , entre la fuerza y el desplazamiento (retardado) es (Clough y Penzien 1993; Wolf 1985):

$$\phi_j = \tan^{-1}(2\beta_j) \quad (2-18)$$

El ángulo ϕ_j también se conoce como ángulo de pérdida. Por ejemplo, si β_j es del 10%, el desplazamiento armónico máximo se retrasará en 0,197 radianes (11.3 grados) con respecto a la fuerza máxima. Cuando β_j llega al infinito, ϕ_j está limitado por $\pi/2$.

Existen muchas soluciones de funciones de impedancia disponibles para cimentaciones rígidas, circulares o rectangulares situadas en la superficie, o incrustadas dentro de, un medio espacio uniforme elástico o viscoelástico. En el caso de una cimentación rectangular rígida que descansa sobre la superficie de un medio-espacio con una velocidad de onda cortante V_s , Pais y Kausel (1988), Gazetas (1991) y Mylonakis et al. (2006) revisan las soluciones de impedancia en la literatura y presentan ecuaciones para calcular los términos de rigidez y amortiguamiento en la ecuación 2-14.

Las soluciones describen la rigidez traslacional y el amortiguamiento a lo largo de los ejes x , y y z , la rigidez rotacional y el amortiguamiento en torno a esos ejes (denominados xx , yy y zz). La rigidez se denota k_j , y es una función de las dimensiones de la cimentación, el módulo de corte del suelo, G , la relación de Poisson del suelo, ν , los modificadores de rigidez dinámica, α_j , y los modificadores de empotramiento, n_j :

$$k_j = K_j \alpha_j n_j \quad (2-19)$$

$$K_j = GB^m f\left(\frac{B}{L}, \nu\right), \quad \alpha_j = f(B/L, a_j) \quad (2-20)$$

$$n_j = f(B/L, D/B, d_w/B, A_w/BL) \quad (2-21)$$

Donde K_j es la rigidez estática de la cimentación con frecuencia cero para el modo j , y $m = 1$ para la traslación, y $m = 3$ para la rotación. El módulo de corte, G , debe reflejar los efectos de la reducción del módulo con el aumento de la amplitud de la deformación por corte. ASCE/SEI 7-10, Cargas mínimas de diseño para edificios y otras estructuras (ASCE, 2010), y FEMA P-750, Disposiciones sísmicas recomendadas por el NEHRP para edificios nuevos y otras estructuras (FEMA, 2009), proporcionan la información presentada en la Tabla 2 para ajustar el módulo de corte y la velocidad de onda de corte para grandes niveles de deformación.

El módulo de cortante máximo (o de pequeña deformación), G_0 , puede calcularse a partir de la Ecuación 2-9 como $G_0 = V_s^2 \rho_s$ donde V_s , se basa en mediciones geofísicas en el campo, y ρ_s es la densidad de la masa del suelo. Un valor efectivo promedio de V_s es generalmente calculado a través de una profundidad efectiva del perfil, Z_p , como se describe más adelante. Los modificadores de la rigidez dinámica, α_j , están relacionados con la frecuencia adimensional a_0 :

$$a_0 = \frac{\omega B}{V_s} \quad (2-22)$$

que tiene la interpretación física de ser la relación entre B y aproximadamente un sexto de la longitud de onda sísmica para la frecuencia ω . Este parámetro de frecuencia es esencialmente único para condiciones de medio espacio, pero puede no serlo en presencia de un estrato rígido a poca profundidad (Anoyatis y Mylonakis, 2012). Para el análisis en el dominio del tiempo, se suele seleccionar una única frecuencia ω con el fin de evaluar los coeficientes de resorte y de amortiguación de la cimentación que dependen de a_0 . Esta puede tomarse como la frecuencia correspondiente al periodo asociado a la respuesta dominante de la

estructura. En la mayoría de los casos, será el primer modo, el período de la base flexible.

Tabla 2: Valores de la velocidad de la onda de corte y la reducción del módulo de corte para varias clases de sitios y amplitudes de movimiento (ASCE, 2010; FEMA, 2009)

Site Class	Reduction Factor (V_s)			Reduction Factor (G/G_0)		
	$S_{DS}/2.5$ ⁽¹⁾			$S_{DS}/2.5$ ⁽¹⁾		
	≤ 0.1	0.4	≥ 0.8	≤ 0.1	0.4	≥ 0.8
A	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
B	1.00	0.97	0.95	1.00	0.95	0.90
C	0.97	0.87	0.77	0.95	0.75	0.60
D	0.95	0.71	0.32	0.90	0.50	0.10
E	0.77	0.22	(2)	0.60	0.05	(2)
F	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)

Notes: ⁽¹⁾ S_{DS} is the short period spectral response acceleration parameter defined in ASCE/SEI 7-10; use straight line interpolation for intermediate values of $S_{DS}/2.5$.

⁽²⁾ Value should be evaluated from site-specific analysis.

La tabla 3 enumera las expresiones de la rigidez estática de la cimentación, K_j , para tres grados de libertad traslacionales y tres rotacionales para una zapata rectangular rígida situada en la superficie del suelo. Estas ecuaciones son similares para Pais y Kausel (1988), Gazetas (1991) y Mylonakis et al. (2006).

El empotramiento de la cimentación por debajo de la superficie del suelo aumenta la rigidez estática de la fundación. Los factores, n_j , para aumentar K_j por los efectos del empotramiento se proporcionan en la Tabla 4. Las ecuaciones de Pais y Kausel (1988) son las más utilizadas en la práctica. Las ecuaciones de Gazetas (1991) y Mylonakis et al. (2006) son más generales, tienen en cuenta los efectos de empotramiento resultantes de la separación entre el suelo y las paredes laterales de los cimientos.

Las ecuaciones para los modificadores de rigidez dinámica, α_j , y los ratios de amortiguamiento, β_j , para las zapatas rígidas situadas en la superficie del suelo se

proporcionan en la Tabla 5. Los modificadores de rigidez dinámica y los ratios de amortiguamiento para zapatas empotradas se proporcionan en la Tabla 6.

Rigidez estática K_j , para evaluar a interacción suelo-estructura se utilizará el coeficiente de rigidez estática K_j propuesto por la NIST GCR-12-971-21 y se adaptará ciertas fórmulas que esta propone.

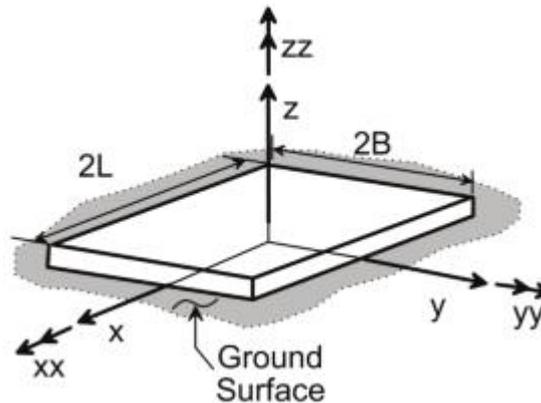


Figura 5: Dimensiones de zapata para el cálculo de rigideces

Fuente: NIST GCR-917-21

Dónde:

2L: es la longitud la cimentación, y

2B: es el ancho de la cimentación

Tabla 3: Soluciones elásticas para la rigidez estática de cimentación rígida en la superficie del suelo.

Grados de libertad	Gazetas (1991) Mylonakis et al. (2006)
Traslación en el eje z	$K_z = \frac{2GL}{1-\nu} \left[0.73 + 1.54 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.75} \right]$
Traslación en el eje y	$K_y = \frac{2GL}{2-\nu} \left[2 + 2.5 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.85} \right]$
Traslación en el eje x	$K_x = K_y - \frac{0.2}{0.75-\nu} GL \left(1 - \frac{B}{L} \right)$

Torsión en el eje z	$K_{zz} = GJ_t^{0.75} \left[4 + 11 \left(1 - \frac{B}{L} \right)^{10} \right]$
Rotación en el eje y	$K_{yy} = \frac{G}{1 - \nu} (I_y)^{0.75} \left[3 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.15} \right]$
Rotación en el eje x	$K_{yy} = \frac{G}{1 - \nu} (I_x)^{0.75} \left(\frac{L}{B} \right)^{0.25} \left[2.4 + 0.5 \left(\frac{B}{L} \right) \right]$

Fuente: NIST GCR 12-917-21.

Dónde:

Los ejes deben estar orientados de tal manera que $L \geq B$.

- I_i = momento de inercia del área de contacto suelo-cimiento, i denota en qué eje tomar la superficie.
- $J_t = I_x + I_y$, momento polar de inercia de la superficie de contacto suelo-cimentación.
- G = módulo de corte (reducido para grandes efectos de deformación, por ejemplo, Tabla 2).

Modificadores de empotramiento n_j , los factores de empotramiento aumentan la rigidez estática de la cimentación K_j , y se determinan mediante ecuaciones establecidas en la tabla 4. Las consideraciones que se deben tener en cuenta son las siguientes:

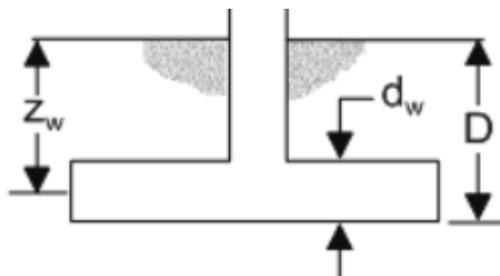


Figura 6: Dimensiones de empotramiento para calcular Factores de corrección de empotramiento para la rigidez estática de las zapatas rígidas

Fuente: NIST GCR-12-917-21

Tabla 4: Factores de corrección para la rigidez estática de zapatas rígidas

Grados de libertad	Gazetas (1991); Mylonakis et al. (2006)
Traslación en el eje z	$n_z = \left[1 + \frac{D}{21B} \left(1 + 1.3 \frac{B}{L} \right) \right] \left[1 + 0.2 \left(\frac{A_w}{4BL} \right)^{2/3} \right]$
Traslación en el eje y	$n_y = \left(1 + 0.15 \sqrt{\frac{D}{B}} \right) \left[1 + 0.52 \left(\frac{z_w A_w}{BL^2} \right)^{0.4} \right]$
Traslación en el eje x	La misma ecuación que para n_y , pero el término A_w cambia para $B \neq L$.
Torción en el eje z	$n_{zz} = 1 + 1.4 \left(1 + \frac{B}{L} \right) \left(\frac{d_w}{B} \right)^{0.9}$
Rotación en el eje y	$n_{yy} = 1 + 0.92 \left(\frac{d_w}{B} \right)^{0.6} \left[1.5 + \left(\frac{d_w}{D} \right)^{1.9} \left(\frac{B}{L} \right)^{-0.6} \right]$
Rotación en el eje x	$n_{yy} = \frac{G}{1 - \nu} (I_x)^{0.75} \left(\frac{L}{B} \right)^{0.25} \left[2.4 + 0.5 \left(\frac{B}{L} \right) \right]$

Fuente: NIST GCR 12-917-21.

Dónde:

Los ejes deben estar orientados de tal manera que $L \geq B$.

- d_w = altura de la cimentación.
- z_w = profundidad hasta el centroide de la cimentación.
- A_w = área de contacto pared lateral-sólido, para una altura de contacto efectiva constante, d_w , a lo largo del perímetro.

Para cada grado de libertad, calcular $K_{emb} = \eta K_{sur}$

Términos de acoplamiento:

$$K_{emb,rx} = \left(\frac{D}{3} \right) K_{emb,x}$$

$$K_{emb,ry} = \left(\frac{D}{3}\right) K_{emb,y}$$

Modificadores de rigidez dinámica, α_j , los modificadores de la rigidez dinámica se muestran en la tabla 5.

Tabla 5: Modificadores de rigidez dinámica para zapatas

Grados de libertad	Modificadores de rigidez
Traslación en el eje z	$\alpha_z = 1 - \left[\frac{\left(0.4 + \frac{0.2}{L/B}\right) a_0^2}{\left(\frac{10}{1 + 3(L/B - 1)}\right) + a_0^2} \right]$
Traslación en el eje y	$\alpha_y = 1$
Traslación en el eje x	$\alpha_x = 1$
Torción en el eje z	$\alpha_{zz} = 1 - \left[\frac{\left(0.33 - 0.03\sqrt{L/B - 1}\right) a_0^2}{\left(\frac{0.8}{1 + 0.33(L/B - 1)}\right) + a_0^2} \right]$
Rotación en el eje y	$\alpha_{yy} = 1 - \left[\frac{0.55a_0^2}{\left(0.6 + \frac{1.4}{(L/B)^3}\right) + a_0^2} \right]$
Rotación en el eje x	$\alpha_{yy} = 1 - \left[\frac{\left(0.55 + 0.01\sqrt{L/B - 1}\right) a_0^2}{\left(2.4 - \frac{0.4}{(L/B)^3}\right) + a_0^2} \right]$

Dónde:

Los ejes deben estar orientados de tal manera que $L \geq B$.

- El amortiguamiento histerético del suelo, β_s , es aditivo al amortiguamiento por radiación de la cimentación β_s .
- $a_0 = \frac{\omega B}{V_s}$
- $\psi = \sqrt{2(1 - \nu)(1 - 2\nu)}$; $\psi \leq 2.5$

Modificadores de amortiguamiento, β_j , los modificadores de amortiguamiento se muestran en la tabla 6.

Tabla 6: Modificadores de amortiguamiento para zapatas

Grados de libertad	Modificadores de rigidez
Traslación en el eje z	$\beta_z = \left[\frac{4\psi(L/B)}{(K_{z,sur}/GB)} \right] \left(\frac{a_0}{2\alpha_z} \right)$
Traslación en el eje y	$\beta_y = \left[\frac{4(L/B)}{(K_{y,sur}/GB)} \right] \left(\frac{a_0}{2\alpha_y} \right)$
Traslación en el eje x	$\beta_x = \left[\frac{4(L/B)}{(K_{x,sur}/GB)} \right] \left(\frac{a_0}{2\alpha_x} \right)$
Torción en el eje z	$\beta_{zz} = \left[\frac{(4/3)[(L/B)^3 + (L/B)]a_0^2}{\left(\frac{K_{zz,sur}}{GB^3} \right) \left[\left(\frac{1.4}{1 + 3(L/B - 1)^{0.7}} \right) + a_0^2 \right]} \right] \left(\frac{a_0}{2\alpha_{zz}} \right)$
Rotación en el eje y	$\beta_{yy} = \left[\frac{(4/3)(L/B)^3 a_0^2}{\left(\frac{K_{yy,sur}}{GB^3} \right) \left[\left(\frac{1.8}{1 + 1.75(L/B - 1)} \right) + a_0^2 \right]} \right] \left(\frac{a_0}{2\alpha_{yy}} \right)$
Rotación en el eje x	$\beta_{xx} = \left[\frac{(4\psi/3)(L/B)a_0^2}{\left(\frac{K_{xx,sur}}{GB^3} \right) \left[\left(2.2 - \frac{0.4}{(L/B)^3} \right) + a_0^2 \right]} \right] \left(\frac{a_0}{2\alpha_{xx}} \right)$

Desempeño sísmico, El desempeño sísmico está relacionado en cuanto fiable resulta el comportamiento de una estructura ante un sismo, es decir en qué condiciones quedará el edificio después del evento telúrico, de ahí es que parte el diseño sísmico por desempeño, en la capacidad de diseñar estructuras fiables y que permita a los interesados cuantificar los riesgos sísmicos, de esta manera se selecciona un nivel de comportamiento deseado, de acuerdo con sus necesidades, teniendo así un nivel mínimo de confianza (FEMA 349).

Niveles de desempeño, según (ATC 40, 1996) para determinar el nivel de desempeño de una edificación se considera los aspectos siguientes:

- Daños físicos tanto en los elementos estructurales como en los no estructurales.
- Riesgos del edificio en evaluación a los que los ocupantes están expuestos, es decir, si siguen o no funcionando los servicios esenciales.

Propuesta SEAOC, la propuesta SEAOC 1996 establece 4 niveles de desempeño para los elementos no estructurales y no estructurales.

1. **Totalmente operacional (TO):** el daño estructural es nulo, los sistemas resistentes a fuerzas laterales conservan todas sus propiedades.
2. **Operacional (OP):** se observan agrietamientos en los elementos estructurales. El daño es relativamente pequeño.
3. **Seguridad de vida (SV):** los daños son moderados en ciertos elementos. Se tiene cierta pérdida en la resistencia y rigidez de los sistemas resistentes a fuerzas laterales. Sin embargo, La estructura permanece funcional.
4. **Pre-colapso (PC):** los daños ocasionados son severos en los elementos estructurales, incluso ha de ser inevitable demoler la estructura.

Demanda sísmica, Vision 2000 (SEAOC, 1995) establece también cuatro niveles de demanda sísmica, los mismos que se definen según la probabilidad de ocurrencia y período de retorno. Sin embargo, estos sismos están calibrados según la realidad sísmica norteamericana, por lo que, en esta investigación se empleara el espectro elástico se definido en la norma E.030 (2018)

Para esta investigación se considera cuatro niveles de demanda sísmica según se muestra la siguiente Tabla 7.

Tabla 7: Niveles de sismo de diseño

Movimiento sísmico de diseño	Periodo de retorno, años	Probabilidad de excedencia, %	Nivel de demanda sísmica
Frecuente	43	50 en 30 años	$S_u = \frac{f_{min} S A_0 \alpha}{(R^* / I)}$
Ocasional	72	50 en 50 años	$S_u = 1.4 \frac{f_{min} S A_0 \alpha}{(R^* / I)}$
Raro	475	10 en 50 años	$S_u = S A_0 \alpha I$
Muy raro	970	10 en 100 años	$S_u = 1.2 S A_0 \alpha I$

Fuente: Medina, Ricardo. y Music, Juan. (2018)

Objetivos de desempeño, Un objetivo de desempeño está definido como el grado de daño de la estructura ante un sismo, es decir, la relación de nivel de desempeño vs nivel de demanda sísmica.

El comité Vision 2000 establece objetivos mínimos de desempeño, en lo que denomina matriz de objetivos de diseño según la Tabla 8.

Tabla 8: Matriz de objetivos de diseño

Nivel de demanda sísmica	Nivel de desempeño sísmico			
	Totalmente operacional	Operacional	Seguridad de vida	Pre colapso
Frecuente	OB	X	X	X
Ocasional	OEP	OB	X	X
Raro	OSC	OEP	OB	X
Muy raro	-	OSC	OEP	OB

Fuente: Medina, Ricardo. y Music, Juan. (2018)

Dónde:

OB: Objetivo Básico: edificios habitacionales, oficinas.

OEP: Objetivo Esencial y Peligroso: edificios esenciales como hospital, establecimientos policiales e instalaciones peligrosas.

OSC: Objetivo de Seguridad Crítica: edificios donde se amacena elementos tóxicos e inflamables, radiactivos, etc

X: objetivo inaceptable.

En la tabla 9 se establece el desplazamiento objetivo para los niveles de desempeño. El desplazamiento objetivo debe ser menor a los valores que se señalan en dicha tabla para así poder cumplir con los objetivos de desempeño.

Tabla 9: Desplazamiento objetivo máximo para niveles de desempeño.

Nivel de desempeño	Desplazamiento objetivo D_t/H , %
Totalmente Operacional	≤ 0.2
Operacional	≤ 0.5
Seguridad de Vida	≤ 1.5
Pre Colapso	≤ 2.5
Colapso	> 2.5

Fuente: Medina, Ricardo. y Music, Juan. (2018)

Dónde:

D_t : es el desplazamiento máximo lateral del nivel superior del edificio respecto al techo inferior.

H : altura del edificio.

Punto de desempeño, representa una estimación del desplazamiento máximo que la estructura experimentará bajo un determinado nivel de amenaza sísmica.

Existen dos normas internacionales que permiten determinar el punto de desempeño (desplazamiento objetivo) de una estructura: el código FEMA 440-05 que emplea el Método del Espectro de Capacidad (MEC) para determinar el punto de desempeño y el código ASCE/SEI 41-13 que lo hace a través del Método de coeficientes (MC).

Método del espectro de capacidad, el MEC es un procedimiento muy usado actualmente para analizar el punto de desempeño de una estructura. El método emplea un procedimiento gráfico para poder comparar la capacidad del sistema

ante las fuerzas laterales debido a la demanda sísmica, esto se representa a través de un espectro elástico simplificado (FEMA 440, 2005, p 73).

Parámetros básicos para la linealización equivalente, los parámetros lineales equivalentes óptimos (es decir, el período efectivo, T_{eff} , y el amortiguamiento efectivo, β_{eff}) se determinan mediante un análisis estadístico que minimiza, de manera rigurosa, las ocurrencias extremas de la diferencia (es decir, el error) entre la respuesta máxima de un sistema inelástico real y su contraparte lineal equivalente (FEMA 440, 2005, p 74).

Estos parámetros son:

Amortiguamiento efectivo, os valores de amortiguamiento viscoso efectivo, expresados como un porcentaje del amortiguamiento crítico, para todos los tipos de modelos histéricos y valores alfa tienen la siguiente forma:

$$\beta_{eff} = 4.9(\mu - 1)^2 + 1.1(\mu - 1) + \beta_0$$

Periodo efectivo, los valores del período efectivo para todos los tipos de modelos histéricos y los valores alfa tienen la siguiente forma:

$$T_{eff} = [0.2(\mu - 1)^2 + 0.038(\mu - 1)^3 + 1]T_0$$

Estos parámetros lineales efectivos, tales como: periodo inicial T_0 , amortiguamiento inicial β_0 y ductilidad μ . están en función de características de la curva de capacidad. En esta investigación se muestran las ecuaciones para el tramo de ductilidad menor a 4 ($1 < \mu < 4$).

Reducción espectral para una amortiguación efectiva, los procedimientos de linealización equivalentes aplicados en la práctica normalmente requieren el uso de factores de reducción espectral para ajustar un espectro de respuesta inicial a un nivel apropiado de amortiguación efectivo, β_{eff} . También son una forma práctica

de ajustar la amortiguación de la cimentación. En el caso del amortiguamiento de la fundación, el valor inicial de amortiguación, β_0 , para una base flexible se modifica el modelo estructural de la base fija lineal valor, $\beta_i = 5\%$. Estos Los factores son una función del Amortiguamiento efectivo y se denominan coeficientes de amortiguamiento, $B_{(\beta_{eff})}$ (FEMA 440, 2005, p 77).

Se utiliza para ajustar las ordenadas de aceleración espectral de la siguiente manera:

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

Existen varias opciones en los procedimientos actuales para determinar la $B_{(\beta_{eff})}$, es recomendable emplear la siguiente:

$$B(\beta_{eff}) = \frac{4}{5.6 - \ln(\beta_{eff})}$$

Procedimiento de solución, para obtener el punto de desempeño en esta investigación el procedimiento que se ha seguido es el siguiente:

1. Seleccione un espectro de demanda de interés con una amortiguación inicial, $\beta_i = 5\%$
2. Modificar el espectro seleccionado, según corresponda, para la interacción suelo-estructura (ISE) de conformidad con los procedimientos del capítulo 9 de FEMA 440. Esto implica tanto una reducción potencial de las ordenadas espectrales para la interacción cinemática como una modificación en el amortiguamiento del sistema a partir del valor inicial, β_i a β_0 , para tener en cuenta el amortiguamiento de los cimientos. Si se ignora la amortiguación de los cimientos, β_0 es igual a β_i .
3. Convierta el espectro seleccionado, modificado para ISS cuando sea apropiado, a un formato de espectro de respuesta de aceleración-

desplazamiento de acuerdo con la guía del ATC-40. Este espectro es la demanda inicial de ADRS (ver Figura 7).

4. Generar una curva de capacidad para la estructura a ser analizada. Esta es una relación fundamental para un modelo SDOF de la estructura entre la aceleración y el desplazamiento espectral (ver Figura 6-6). Una guía detallada está disponible en ATC-40 y FEMA 356 (ver Figura 7).
5. Seleccione un punto de rendimiento inicial (aceleración máxima, a_{pi} , y desplazamiento, d_{pi}). Esto puede basarse en una aproximación de igual desplazamiento como la que se muestra en la Figura 7.

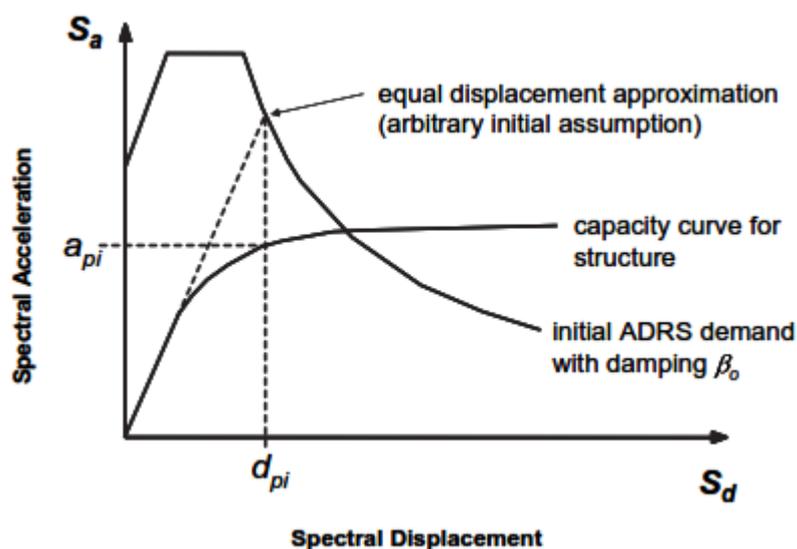


Figura 7: Espectro de demanda y espectro de capacidad inicial

Fuente: FEMA 440, 2005.

6. Desarrollar una representación bilineal del espectro de capacidad de acuerdo con los procedimientos del ATC-40. Esto define el período inicial, T_0 , desplazamiento de rendimiento, d_y , y aceleración de rendimiento, a_y tal como se muestra en la Figura N° 2. Nótese que estos parámetros pueden variar para diferentes supuestos a_{pi} y d_{pi} .

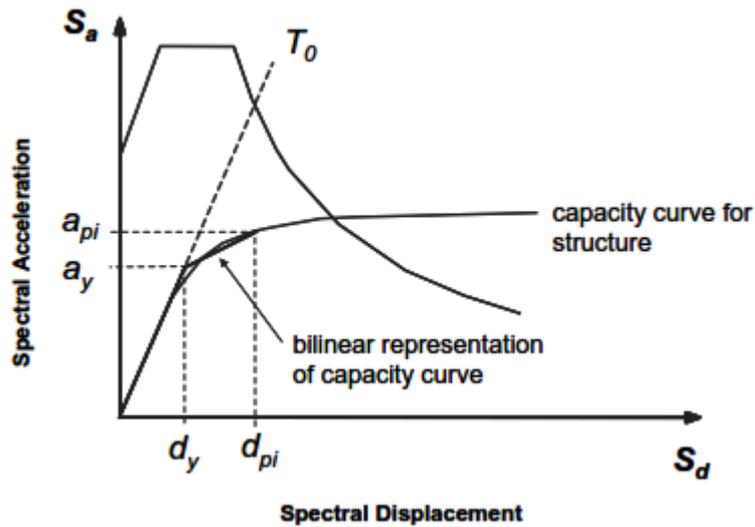


Figura 8: Representación bilineal del espectro de capacidad

Fuente: FEMA 440, 2005.

7. Para la representación bilineal desarrollada en el paso 6, calcular los valores de la rigidez post-elástica, α , y la ductilidad, μ , como sigue:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\frac{a_y}{d_y}} \qquad \mu = \frac{d_{pi}}{d_y}$$

8. Utilizando los valores calculados para la rigidez post-elástica, α , y la ductilidad, μ , del Paso 7, calcular el correspondiente amortiguamiento efectivo, β_{eff} .
9. Utilizando la amortiguación efectiva determinada en el paso 8, ajuste la ADRS inicial a β_{eff} .
10. Determinar el desplazamiento máximo estimado, d_i , utilizando la intersección del período efectivo radial, T_{eff} , con la ADRS para β_{eff} . La aceleración máxima estimada, a_i , es la correspondiente a d_i en la curva de capacidad según la Figura 3.

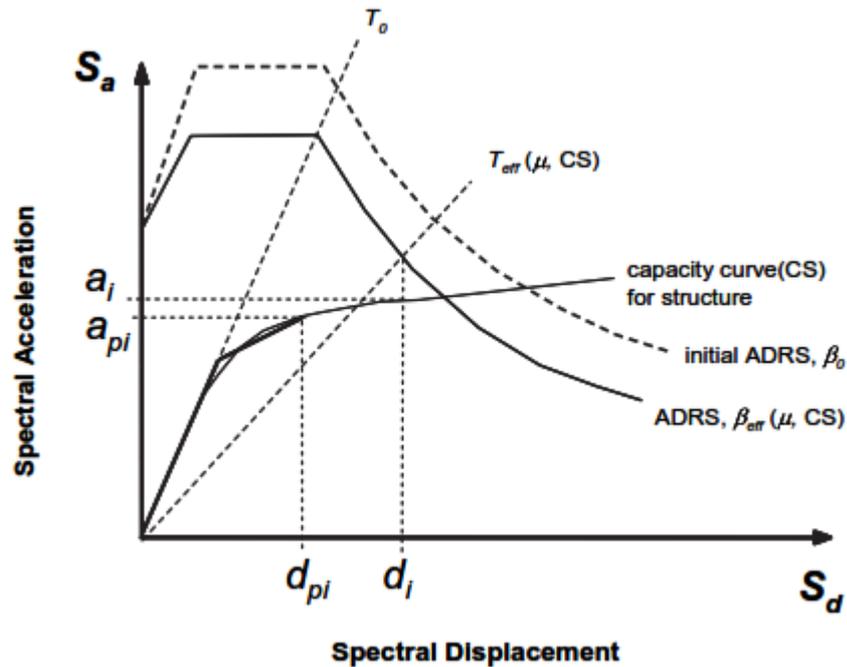


Figura 9: Determinación del desplazamiento máximo estimado mediante iteración directa (FEMA-440, 2005).

11. Comparar el desplazamiento máximo estimado, d_i , con el supuesto inicial (o anterior). Si está dentro de la tolerancia aceptable, el punto de rendimiento corresponde a a_i y d_i . Si no está dentro de la tolerancia aceptable, repita el proceso a partir del paso 5 utilizando a_i y d_i .

Método de coeficientes, Díaz, J. y Diaz, C. (2020), el Método de Coeficientes es un procedimiento estático no lineal presentado en el ASCE/SEI 41-13. Este enfoque modifica la respuesta elástica lineal del sistema de 1 GDL equivalente multiplicándolo por una serie de coeficientes para generar una estimación del desplazamiento global máximo (elástico e inelástico), que se denomina Desplazamiento Objetivo (punto de desempeño). El proceso inicia con una curva idealizada fuerza-deformación (Pushover), que relaciona el desplazamiento (techo) con el cortante en la base.

Curva idealizada de Fuerza-Desplazamiento: para obtener la curva idealizada fuerza-deformación se debe utilizar un procedimiento grafico iterativo que iguale aproximadamente las áreas, de modo que la energía disipada por la estructura

(área debajo de la curva no lineal Pushover), sea igual a la energía disipada por la curva idealizada mediante un sistema elastoplástico (ASCE/SEI 41, 2017, p 74). El primer segmento de línea de la curva idealizada comenzará en el origen y tendrá una pendiente igual a la rigidez lateral efectiva K_e , siendo ésta la rigidez secante calculada para un cortante igual al 60% del cortante de fluencia de la estructura V_y como se muestra en la Figura 4 (ASCE/SEI 41, 2017, p 74).

El segundo segmento de línea representará la pendiente positiva posterior a la fluencia ($\alpha_1 K_e$), determinada por un punto (V_d, Δ_d) y un punto en la intersección con el primer segmento correspondiente a (V_y, Δ_y). El punto (V_d, Δ_d) es un punto sobre la curva de capacidad real en el desplazamiento objetivo calculado, o en el desplazamiento correspondiente al cortante máximo de la base, el que sea menor (ASCE/SEI 41, 2017, p 74).

El tercer segmento de línea representará la pendiente negativa posterior a la fluencia ($\alpha_2 K_e$), determinada por el punto (V_d, Δ_d) y el punto en el que el cortante basal se degrada al 60% de la resistencia de fluencia efectiva (ASCE/SEI 41, 2017, p 74).

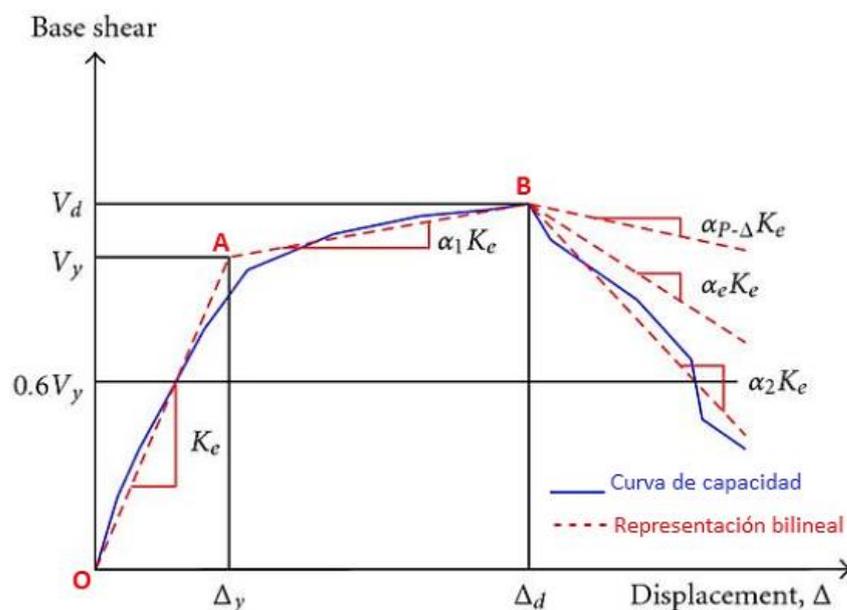


Figura 10: Curva idealizada de fuerza-desplazamiento (ASCE/SEI 41-14, 2017).

Cálculo del Periodo Efectivo: El período fundamental efectivo en la dirección de análisis se basará en la curva idealizada de fuerza-desplazamiento y se calcula según la ecuación que se muestra a continuación (ASCE/SEI 41, 2017, p 75).

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}}$$

Dónde:

T_i : es el periodo fundamental elástico (en, s) en la dirección de análisis, obtenida mediante análisis dinámico elástico.

K_i : es la rigidez lateral elástica de la estructura en la dirección de análisis.

K_e : es la rigidez lateral efectiva de la estructura en la dirección de análisis.

Calcular el desplazamiento objetivo: el desplazamiento objetivo δ_t , se calcula con la siguiente expresión.

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$$

Donde:

C_0 : es el factor de modificación para relacionar el desplazamiento espectral de un sistema equivalente de 1GDL con el desplazamiento del techo del sistema de varios GDL de edificio calculado mediante uno de los siguientes procesos:

- El factor de participación de masa del primer modo multiplicado por la ordenada de la forma del primer modo en el nodo de control.
- El factor de participación de masa calculado usando un vector de forma correspondiente a la forma desviada del edificio en el desplazamiento objetivo multiplicado por la ordenada del vector de forma en el nodo de control
- O el valor apropiado de la Tabla 10.

Tabla 10: Valores para el factor de modificación C_0

Nº Pisos	Patrón de carga triangular	Patrón de carga uniforme	Otro patrón de carga
1	1	1	1
2	1.2	1.15	1.2
3	1.2	1.2	1.3
5	1.3	1.2	1.4
10+	1.3	1.2	1.5

Fuente: ASCE/SEI 41-17, 2017

C_1 : Factor de modificación para relacionar los máximos desplazamientos inelásticos esperados con los desplazamientos calculados para la respuesta elástica lineal. Para periodos inferiores a 0.2 s, C_1 no tiene que ser mayor que el valor a $T = 0.2$ s. Para periodos superiores a 1.0 s, $C_1 = 1.0$.

$$C_1 = 1 + \frac{\mu_{strength} - 1}{aT_e^2}$$

Dónde:

El valor de a corresponde a la clasificación del tipo de suelo en el sitio, según la norma ASCE 7:

a : 130 para clasificación de sitio A o B (roca).

a : 90 para clasificación de sitio C (suelo denso y roca suave), y

a : 60 para clasificación de sitio D, E o F (suelos rígidos, arcillosos o sin clasificación).

$\mu_{strength}$: relación entre de resistencia a la fluencia y la demanda de resistencia elástica calculada según la siguiente ecuación.

$$\mu_{strength} = \frac{S_a}{V_y/W} C_m$$

C_2 : Factor de modificación para representar el efecto de la forma de los ciclos histeréticos, la degradación cíclica de la rigidez y el deterioro de la resistencia en la respuesta de desplazamiento máximo. Para periodos superiores a 0,7 s, $C_2 = 1,0$.

$$C_1 = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{\mu_{strength} - 1}{T} \right)^2$$

S_a = Aceleración del espectro de respuesta para un periodo T_e .

T_e = Período fundamental efectivo del edificio en la dirección de análisis, en s.

V_y = Resistencia de fluencia del edificio en la dirección considerada calculada de la curva idealizada fuerza-deformación.

W = Peso sísmico efectivo, según corresponda.

C_m = Factor de masa efectiva (ver tabla 7-4 de ASCE/SEI 41-17).

Corrección del desplazamiento objetivo por diafragma no rígido.

$$\delta_t = n\delta_t$$

Dónde: $n = \frac{\delta_{max}}{\delta_{prom}}$

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

Tipo de investigación

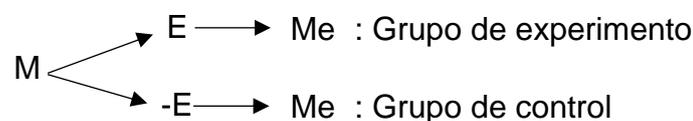
Para Borja (2015) la Investigación aplicada es aquella en la que se busca conocer, actuar, o modificar una realidad problemática y tales resultados del estudio sean utilizados en la solución de problemas de ingeniería cotidianos (p.10).

Consecuentemente, la investigación que se desarrolla en este trabajo investigativo es **investigación aplicada**, por el motivo que se aplicarán procesos científicos en la evaluación de la interacción suelo estructura de un edificio de concreto armado y ver su influencia en el desempeño sísmico del mismo y determinar si se satisfacen ciertas sollicitaciones.

Diseño de la investigación

El cuasi – experimento es una investigación en la que el grupo de estudio ya determinado, se manipula premeditadamente la variable independiente para estudiar el efecto mediante un proceso riguroso para comprobar la veracidad o falsedad de las hipótesis causales (Vara, 2012, pp.213-214)

Siendo una situación controlada por el investigador. Implica que el investigador ejerce la acción sobre alguna de las variables y mide la influencia (variable independiente) o el efecto de dicha manipulación (variable dependiente).



Dónde:

M: muestra

E: estímulo de la variable X

-E: ausencia del estímulo

Me: Medición de la variable X

Figura 1. Esquema para el estudio de la post prueba (Borja,2015)

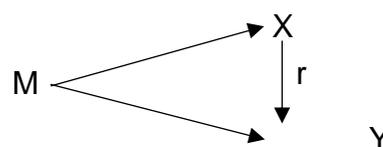
Por lo tanto, en función a los conceptos previos, corresponde para esta investigación el diseño **cuasi – experimental**, debido a que se operará la variable independiente (X): interacción suelo estructura.

Finalmente, el experimento se realizará mediante el estudio con post prueba tal como se muestra en la figura 6, en la que se hace referencia a la medición en presencia y ausencia del estímulo de la variable dependiente, en la que se hace referencia a la medición en presencia y ausencia del estímulo de la variable dependiente. En ese sentido, se aplicará y no la influencia de la interacción suelo estructura a los modelos de análisis del edificio de concreto armado.

Nivel de investigación

Borja (2015) sostiene que las investigaciones correlacionales son aquellas en donde se analiza la relación entre ciertos sucesos, proporcionando indicios de la relación que podría existir entre dos o más cosas. Asimismo, determina como se puede comportar una variable conociendo el comportamiento de otras. Si bien es cierto la investigación correlacional explica la relación entre dos variables, no precisamente significa que una sea la causa de otra.

En tal sentido, la investigación tiene un nivel correlacional, ya que se pretende identificar la relación entre la interacción suelo estructura y el desempeño sísmico de edificios de concreto armado, en la figura N.º 6 se observa la relación que existe entre las variables.



Dónde:

M: muestra

X: variable independiente

Y: variable dependiente

r: relación existente entre las variables

Figura 2. Esquema para el diseño correlacional (Abanto, 2016)

3.2. Variables y operacionalización

Definición conceptual

Variable independiente (X): Interacción suelo estructura.

La interacción suelo-estructura por otro lado considera una base flexible, generándose así esfuerzos de entrada de un sismo más reales, es decir, existe alteración en el movimiento del suelo de fundación debido a la presencia de la estructura (Morales L. y Espinosa A, 2020).

Variable dependiente (Y): desempeño sísmico.

La ingeniería sísmica basada en desempeño (Performance-Based Earthquake Engineering, PBEE), es un proceso que se inicia con el planteamiento de concepción de un proyecto, regida por diversas metodologías, criterios, normas, etc. que nos permitirán diseñar una estructura capaz de resistir la acción sísmica sin colapsar o poner en peligro la seguridad de vida de sus ocupantes (Diaz, L. y Diaz, R., 2020)

Definición operacional

Variable independiente (X): Interacción suelo estructura.

Se evaluará un prototipo de estructura sin considerar la ISE, y otro modelo considerando la ISE, teniendo en cuenta la forma y tipo de la cimentación.

Variable dependiente (Y): desempeño sísmico.

El edificio será evaluado mediante la respuesta estructural, medida mediante el periodo de vibración de la estructura, el desplazamiento lateral de la estructura, la fuerza cortante, el momento de volteo y la fuerza axial.

Dimensiones

Variable independiente (X): Interacción suelo estructura.

Entre las dimensiones de la variable X se tiene: flexibilidad del suelo y coeficientes de interacción (funciones de impedancia).

Variable dependiente (Y): desempeño sísmico.

Entre las dimensiones de la variable Y se tiene: análisis sísmico y respuesta estructural.

Indicadores

Variable independiente (X): Interacción suelo estructura.

Los indicadores para la variable independientes son: el módulo de Poisson, la velocidad de la onda sísmica, modulo de elasticidad del suelo, la rigidez dinámica, modificadores de la rigidez y modificador por empotramiento.

Variable dependiente (Y): desempeño sísmico.

Los indicadores para la variable dependiente son: periodo de vibración, desplazamiento lateral, fuerza cortante, momento de volteo y la fuerza axial.

Escala de medición

Variable independiente (X): Interacción suelo estructura.

Para la variable X, la escala de medición está representada por la razón, según se aprecia en el anexo I.

Variable dependiente (Y): desempeño sísmico.

Para la variable Y la escala de medición está representada por la razón, según se aprecia en el anexo I.

3.3. Población, muestra y muestreo

Población

Para Pineda (2016) la población para el caso de una investigación cuantitativa es el conjunto de todos los casos o elementos que coinciden con una serie de características, que comparten espacio y tiempo común, los cuales se desea investigar para saber datos concretos.

La presente investigación tendrá como **población** todos los edificios de concreto armado de la ciudad de Lima, 2020.

Muestra

“La muestra es un subgrupo de la población de interés sobre el cual se recolectan datos, y que tienen que definirse o delimitarse de ante mano con precisión (Hernández et al., 2018, p.173).

Con base en lo señalado anteriormente, la **muestra** será un edificio ya construido de concreto armado compuesto, con una elevación de 4 niveles y 4 sótanos, puesto que es representativo para el tipo de sistema estructural para la ciudad de Lima, 2020.

Muestreo

Para esta investigación se ha definido que el muestreo es del tipo **no probabilística**, al respecto Borja (2015) sostiene que una muestra del tipo no probabilístico es cuando los elementos a estudiar que se elige no dependen de la probabilidad, sino de las causas que se relacionan con las características del tema investigado y que depende de la toma de la intención del investigador.

Asimismo (Espinoza, 2016) señala que el muestreo por conveniencia es la muestra que está disponible en el periodo en que se desarrollará la investigación.

Según lo indicado anteriormente y debido a las intenciones del investigador además que la investigación se desarrollará durante el año 2020, el tipo de muestreo es **por conveniencia o intencional**.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, valides y confiabilidad

Técnicas de recolección de datos

Para Fernández et. al (2018), la técnica para recolectar datos es el método o forma que se emplea para recaudar la información pertinente, que se refuerza de ciertos factores como son: las variables, la definición operacional, la muestra y los recursos que el investigador tiene a su disposición.

Al respecto Gallardo y Moreno (2018) señalan que el observar de manera estructurada conlleva a que el investigador tiene conocimientos sobre aspectos relevantes o no para los fines de su investigación.

Según lo señalado anteriormente, los datos necesarios se procesarán, mediante la observación estructurada utilizando como herramienta el software Etabs v19.

Instrumentos de recolección de datos

“Recurso que utiliza el investigador para registrar información o datos sobre las variables que tiene en mente” (Hernández et al, 2018, p.200)

Los instrumentos para medir la variable X: interacción suelo estructura consisten en emplear protocolos establecidos en la norma NIST GCR 12-917-21 y en el código FEMA 440-05.

Los instrumentos para medir los indicadores de la variable Y es el uso del software Etabs (versión 19).

Asimismo, se utilizarán hojas de cálculo para la información que se obtiene del análisis de la variable Y a fin de ser procesada con mayor precisión.

Validez

Hernández et. al. (2018) señala que la validez de un instrumento hace referencia al grado en que el instrumento mide realmente la variable, es decir cuantifica de manera significativa la variable.

Confiabilidad

Respecto a la confiabilidad Hernández (2010) agrega que hace referencia al grado en que al ser aplicado a distintos objetos origina iguales resultados.

En esta investigación se emplearán normas técnicas que no requieren de validación ni evaluación de la confiabilidad por parte de expertos ya que han sido elaboradas por equipos altamente especializados y capacitados en la materia y constituyen procedimientos estandarizados con alcance nacional. Asimismo,

respecto al software ETABS no se requiere validez ni fiabilidad dado que es un software mundialmente utilizado y posee una trayectoria de 40 años en análisis y diseño estructural de edificios.

3.5. Procedimiento

Se realiza las gestiones para poder obtener los planos del edificio de oficinas de 7 niveles y 3 sótanos.

Se procede realizar el modelado de la edificación en el software Etabs v19, el modelado incluye 2 prototipos según se indica en la tabla 11 (i) el primer prototipo es un modelo asumiendo que el suelo presenta una rigidez infinita (ii) en el segundo modelo se añaden las propiedades de suelo, es decir la interacción suelo estructura.

Tabla 11: Prototipos de modelado y tipo de análisis

	Análisis tradicional	Interacción suelo estructura
MODELO A	✓	-
MODELO B	✓	✓

Fuente: elaboración propia

Una vez se ha modelado, se procede a aplicar todas las características y propiedades de los materiales y la integración de las normas de diseño y análisis (NIST GCR 12-917-21) para el tipo de modelo que corresponda.

3.6. Método de análisis de datos

Para Borja (2015), el análisis de datos depende del tipo de datos que se obtengan, estos deben ser codificados y representados en una hoja de cálculo, para posteriormente realizar un análisis cuantitativo.

Para la presente investigación, los datos serán analizados mediante cuadros, hojas de cálculo en Excel, NIST GCR 12-917-21, y normas técnicas.

3.7. Aspectos éticos

Como en todo trabajo científico, se debe cumplir ciertos aspectos de **originalidad** y **veracidad**, esta investigación no es la excepción. Por lo tanto, el investigador se compromete a cumplir con la normatividad de la Universidad César Vallejo en su Reglamento de grados y títulos. Siendo así que el investigador evita la falsificación, la piratería, el auto plagio, plagio y fraude.

Para verificar la originalidad de la investigación se hace uso del Turnitin, en el anexo 2 se presenta el informe de originalidad, que certifica que este trabajo es único al tener un porcentaje menor al 25%.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

Descripción del proyecto

El edificio en estudio fue diseñado acorde a las necesidades técnicas de la norma E-030 (2014) y demás normas que en ese año se encontraban vigentes, construido en el año 2017 con un área techada total de 8 857 m²

Características del suelo

La caracterización del suelo se hizo de acuerdo al estudio de mecánica de suelos con fines de cimentación.

Fueron 4 sondajes (C-01, C-02, C-03) necesarios para la caracterización del suelo y se muestran en la tabla 12.

Tabla 12: Sondaje para clasificación del suelo

Sondaje	Profundidad (m)	SUCS	Nivel freático
C-01	0.00 – 2.60	GM	No encontrado
	2.60 – 7.50	GP	
	7.50 – 10.00	GM	
C-02	0.00 – 2.00	GP	No encontrado
	2.00 – 10.50	GP	
	10.50 – 12.50	GW – GM	
	12.50 – 15.50	GP – GM	
C-03	0.00 – 2.00	GP	No encontrado
	2.00 – 12.00	GP	
	12.00 – 14.50	GP	

Fuente: Adaptación del expediente técnico

Del estudio de suelos se concluye que se cimentara por medio de zapatas aisladas y cimientos corridos a una profundidad de -12.00 m más la altura de desplante de la zapata (Df) las mismas que estarán apoyadas sobre gravas pobremente gradadas.

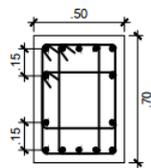
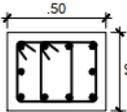
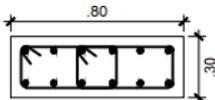
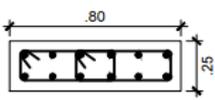
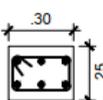
Sismicidad

De acuerdo a los estudios realizados en el área del proyecto el perfil predominante corresponde a gravas pobremente gradadas con arena, de compacidad medianamente densa a muy densa. Para el diseño sísmico se tienen los factores que se muestran a continuación:

- Zona sísmica : Zona 4
- Factor de zona : Z=0.40
- Tipo de suelo : S₁
- Factor de suelo : S=1.0
- Periodo que define la plataforma del factor C : T_P=0.40 s
- Periodo que define el inicio de la zona del factor C : T_L=2.50 s

Revisión de los planos

Para poder realizar el análisis de la estructura existente, mediante un modelo analítico, fue necesario recabar información que sea importante para poder contar con un modelo computacional representativo de las condiciones existentes de la edificación. Al contar con todos los planos estructurales se hizo una revisión de los mismos para definir la información que sería útil para el análisis, verificándose de esa manera que si se cuenta con la información necesaria para su realización.

C-1	C-2	C-3
 <p>14φ1"</p> <p>□ Ø1/2" 1@0.05,7Rto@0.10, Rto@0.15c/e</p>	 <p>10φ3/4"</p> <p>□ Ø3/8" 1@0.05,4@0.10,Rto@0.20c/e</p>	 <p>10φ3/4"</p> <p>□ Ø3/8" 1@0.05,4@0.10,Rto@0.20</p>
C-4	C-5	C-6
 <p>12φ3/4"</p> <p>□ Ø3/8" 1@0.05,4@0.10,Rto@0.15</p>	 <p>12φ3/4"</p> <p>□ Ø3/8" 1@0.05,4@0.10,Rto@0.15</p>	 <p>6φ5/8"</p> <p>□ Ø3/8" 1@0.05,6@0.10,Rto@0.20</p>
C-7	C-8	C-A1

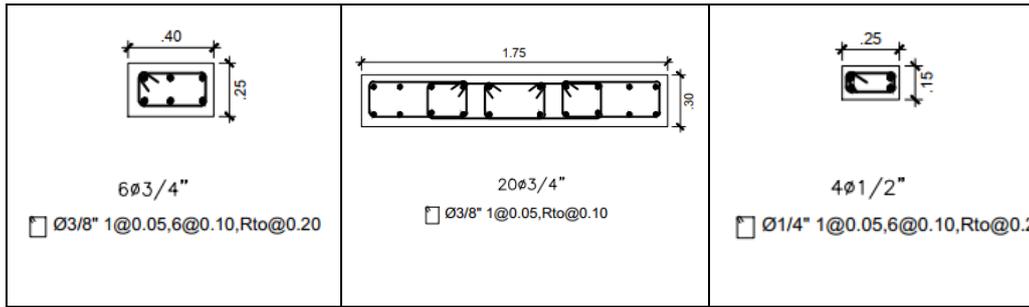


Figura 11: detallado de secciones de columna

Fuente: Planos edificio de oficinas, 7 pisos y 3 sótanos

Las especificaciones técnicas se muestran a continuación:

CONCRETO	
PLACAS Y COLUMNAS	
En sótanos: $f_c = 280 \text{ kg/cm}^2$	
A partir del 1er piso en adelante: $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$	
VIGAS Y LOSAS:	
$f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$	
Zapatas y Cisterna	$f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$
Losa de Montacoches	$f_c = 350 \text{ kg/cm}^2$
Solado y Falsa Zapata	$f_c = 100 \text{ kg/cm}^2$
ACERO	
Acero de refuerzo Grado 60 (ITINTEC 341-031) $f_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$	
Recubrimientos en elementos de concreto armado	
Placas y Columnas	4.0 cm
Losas, vigas chatas y dinteles	2.0 cm
Vigas	4.0 cm
Muros de Contención	4.0 cm
Zapatas	7.5 cm
Albañilería	
Tabiquería : Ladrillos ceramicos Tipo III	
Cercos Perimetricos : Ladrillos ceramicos Tipo IV	

Figura 12: Especificaciones técnicas de los materiales de construcción

Fuente: Planos edificio de oficinas, 7 pisos y 3 sótanos

Características del suelo de fundación

A continuación, se muestra la Tabla 13 con los valores para cada caso solicitado para la caracterización del suelo.

Tabla 13: características del suelo de fundación para el análisis en el software ETABS v.19

Descripción	Valor nominal
Tipo de suelo	S1
Peso específico del suelo	$\gamma_s = 20Kn/cm^3$
Velocidad de onda	$V_s = 635 m/s$
Módulo de corte	$G = \frac{\gamma_s}{g} V_s^2$
Módulo de Poisson de suelo	$\nu = 0.35$

Fuente: adaptado de expediente técnico

Definición del espectro de diseño

Para definir el espectro de diseño se considera lo contemplado en la Norma E-030-2018, cuya fórmula de cálculo se muestra a continuación:

$$S_a = \frac{ZUCS}{R} g \quad (4-1)$$

Los parámetros que intervienen en la ecuación 4-1 se muestran en la tabla 13.

Tabla 14: factores sísmicos para en análisis software ETABS v.19

Descripción	Valor nominal
Zonificación	$Z = 0.45$
Factor de suelo	$S = 1.0$
Factor de uso	$U = 1.0$
Irregularidad en altura	$I_a = 1.0$
Irregularidad en Planta	$I_p = 1.0$
Coeficiente básico de Reducción	$R_0 = 6.0$
Coeficiente de Reducción	$R = R_0 I_a I_p = 6.0$

Fuente: expediente técnico

Se muestra a continuación el espectro de diseño para las direcciones x e y.

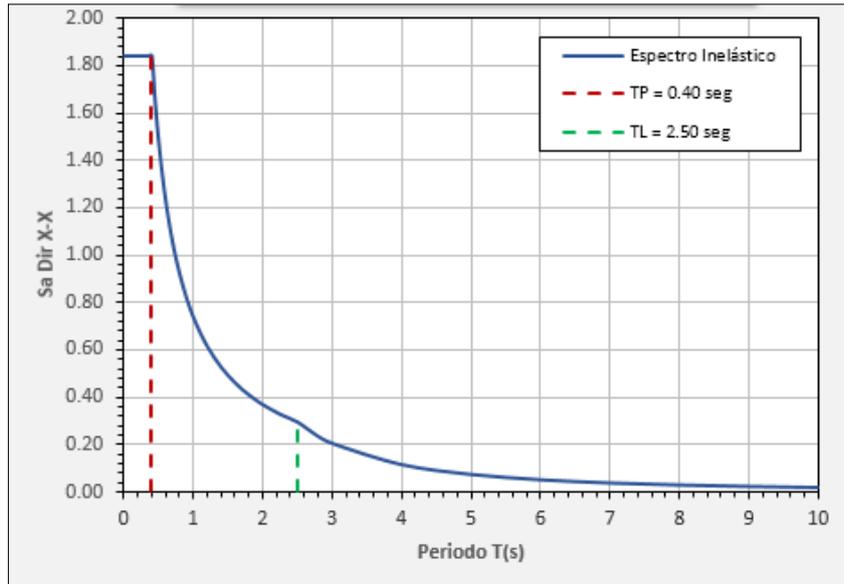


Figura 13: espectro de diseño en el eje x, según Norma E-030

Fuente: elaboración propia

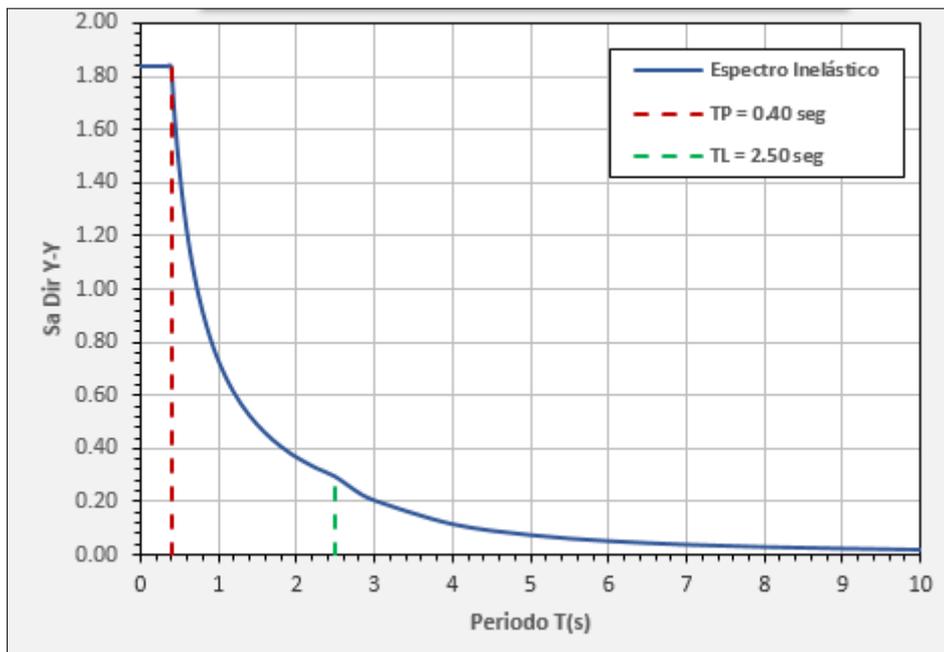


Figura 14: espectro de diseño en el eje x, según Norma E-030

Fuente: elaboración propia

Factor de reducción del módulo de corte

En la tabla 2, se hizo referencia al cálculo del factor de reducción del módulo de corte, en la que depende de la aceleración espectral dividido entre 2.5, es decir $S_a/2.5$ según el tipo de suelo. El FR para los cálculos de esta investigación se muestra en la tabla 15.

Tabla 15: Factor de reducción para el tipo de suelo de fundación

Descripción	S_a	$S_a/2.5$	FR
Suelo S1	1.83	0.73	0.53

Fuente: elaboración propia

Determinación de las rigideces dinámicas según GCR 12-917-21.

En la tabla 15 se muestra un resumen de la aplicación de las fórmulas contenidas en las tablas 3, 4, 5 y 6. Las funciones de impedancia para cada zapata de cimentación se muestran en las tablas 15 a 26.

- Módulo de corte

$$G_{max} = \frac{\gamma}{g} V_s^2 = \left(20.0 \frac{kN}{m^3}\right) \left(635 \frac{m}{s}\right)^2 = 822.35 MPa$$

$$G_{max} * 0.53 = 435.85 MPa$$

- Cálculo de L

Según información en capítulos anteriores la longitud de la zapata es $2L$

$$2L = l$$

$$L = \frac{l}{2} = \frac{4.09}{2} = 2.045 m$$

- Cálculo de B

Según información en capítulos anteriores la longitud de la zapata es $2L$

$$2B = b$$

$$B = \frac{b}{2} = \frac{3.65}{2} = 1.825 m$$

Rigidez traslacional a lo largo del eje z.

- Cálculo de la rigidez, K_z

$$K_z = \frac{2GL}{1-\nu} \left[0.73 + 1.54 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.75} \right] = 660921.65 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

- Modificador por desplante, η_z

$$\eta_z = \left[1 + \frac{D}{21B} \left(1 + 1.3 \frac{B}{L} \right) \right] \left[1 + 0.2 \left(\frac{A_w}{4BL} \right)^{2/3} \right] = 1.6786$$

- Modificador rigidez dinámica, α_z

$$\alpha_z = 1.0 - \frac{\left(0.4 + \frac{0.2}{\frac{L}{B}} \right) a_0^2}{\left[\left(\frac{10}{1 + 3 \left(\frac{L}{B} - 1 \right)} \right) + a_0^2 \right]} = 1.0000$$

- Ecuación general de rigidez dinámica, k_j

La rigidez dinámica es función del modificador de desplante y del modificador de rigidez dinámica anteriormente calculados, esto según la NIST GCR 12-917-21.

$$k_j = K_j \times \alpha_j \times \eta_j$$

$$k_z = K_z \times \alpha_z \times \eta_z$$

$$k_z = \left(660921.65 \frac{\text{tonf}}{\text{m}} \right) (1.0000) (1.6786)$$

$$k_z = 1109430.07 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

Rigidez traslacional con amortiguamiento a lo largo del eje z

- Cálculo de β_z

$$\beta_z = \left[\frac{4\psi(L/B)}{(K_z/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_z} \right]$$

$$\beta_z = \left[\frac{4(0.624)(2.045 \text{ m}/1.825 \text{ m})}{660921.65 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}} \right] \left[\frac{0.0082}{2(1.0000)} \right]$$

$$\beta_z = 0.0016$$

$$k_{z,dam} = \frac{2K_z(0.05 + \beta_z)}{\omega}$$

$$k_{z,dam} = \frac{2 \left(660921.65 \frac{\text{tonf}}{\text{m}} \right) (0.05 + 0.0016)}{2.853}$$

$$k_{z,dam} = 23888.64 \frac{\text{tonf} \cdot \text{s}}{\text{m}}$$

A continuación, se muestra los resultados para todos los casos.

Tabla 16. Rigideces dinámicas sin amortiguamiento

Zapata	Rigideces dinámicas sin amortiguamiento					
	k_x (tonf/m)	k_y (tonf/m)	k_z (tonf/m)	k_{xx} (tonf.m/rad)	k_{yy} (tonf.m/rad)	k_{zz} (tonf.m/rad)
Z-1	1358332.73	1372599.42	1109430.07	440684.09	417767.97	730845.89
Z-2	925867.32	937824.53	791848.28	117318.88	91261.70	168449.48
Z-3	821943.98	881341.80	758082.29	172503.36	58382.14	132392.24
Z-4	1335156.19	1356007.41	1093036.51	478584.78	420438.07	755559.58
Z-5	1031590.17	1053955.58	925059.37	151937.76	98037.05	184481.46
Z-6	780055.04	825681.64	678229.08	267462.94	110443.75	255609.36
Z-7	942324.93	950225.81	802120.43	133356.15	107271.50	194539.20
Z-8	875965.85	912482.10	772780.27	169522.91	84114.79	166846.84
Z-9	783215.81	918699.00	769883.70	1599935.75	132634.40	1465387.74
Z-10	1508480.92	1780436.90	1533396.09	2954479.44	244897.15	2644818.02
Z-11	1620403.12	1905885.50	1598438.55	3625451.46	283427.00	3393910.90

Fuente: elaboración propia

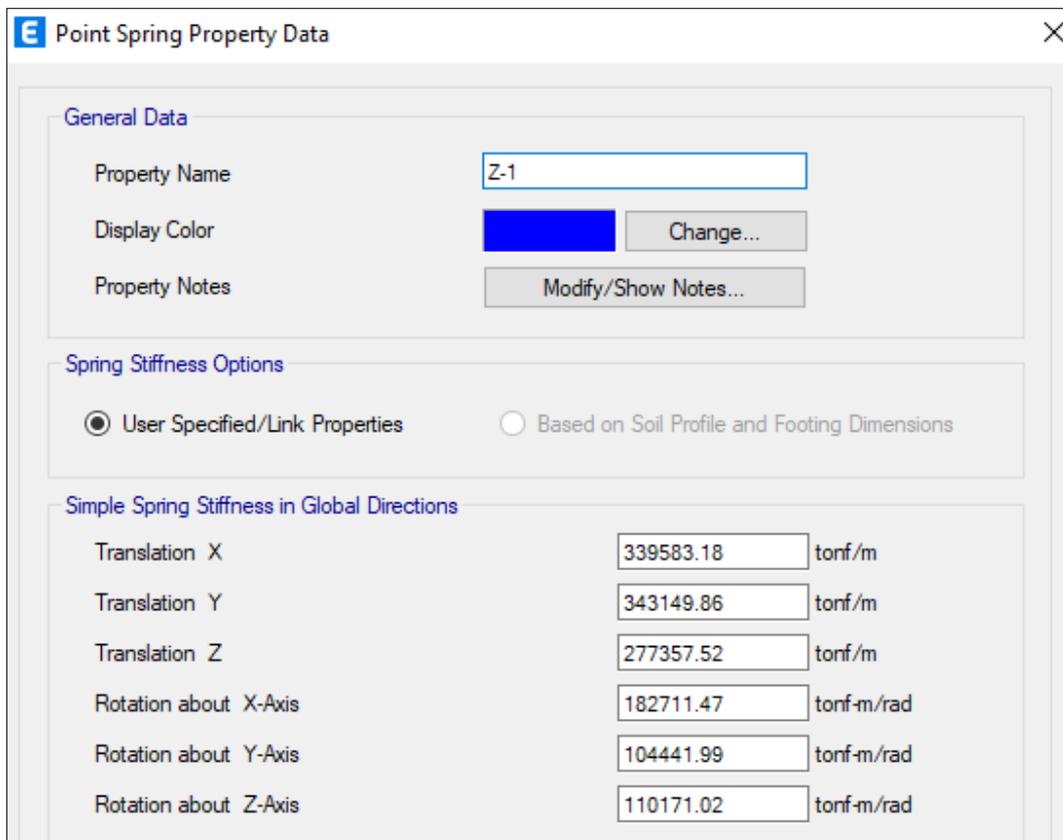
Tabla 17. Rigideces dinámicas con amortiguamiento

Zapata	Rigideces dinámicas con amortiguamiento					
	k_x (tonf.s/m)	k_y (tonf.s/m)	k_z (tonf.s/m)	k_{xx} (tonf.m.s/rad)	k_{yy} (tonf.m.s/rad)	k_{zz} (tonf.m.s/rad)
Z-1	19138.64	19327.56	23888.64	9423.54	8279.06	12982.98
Z-2	10328.7	10457.51	13085.28	1647.58	1394.22	2226.11
Z-3	8558.74	9159.84	11089.27	1609.16	532.56	1523.64
Z-4	19322.47	19605.85	24169.8	10200.54	8276.82	13492.35
Z-5	10253.76	10468.44	13044.93	1761.6	1300.73	2225.84
Z-6	9533.78	10068.46	12234.76	3375.55	1396.33	3403.59
Z-7	10614.42	10700.29	13410.45	1701.21	1544.64	2385.09
Z-8	9578.27	9964.69	12293.61	1741.69	940.61	1926.58
Z-9	21043.13	24533.82	26688.76	36768.94	1682.05	39844.81
Z-10	19255.11	22604.11	24405.78	28911.52	1088.16	32699.63
Z-11	21967.11	25676.77	27811.15	41944.68	1764.62	46313.59

Fuente: elaboración propia

Asignación de rigideces

En el modelo B (CON ISE) se definió las rigideces obtenidas en la tabla 17 en el programa Etabs v19, en la sección Point Spring Property Data.



Property Name	Value	Unit
Property Name	Z-1	
Display Color	Blue	
Property Notes		
Translation X	339583.18	tonf/m
Translation Y	343149.86	tonf/m
Translation Z	277357.52	tonf/m
Rotation about X-Axis	182711.47	tonf-m/rad
Rotation about Y-Axis	104441.99	tonf-m/rad
Rotation about Z-Axis	110171.02	tonf-m/rad

Figura 15. Definición de rigideces.

Fuente: elaboración propia

Para poder considerar la ISE en el comportamiento estructural del edificio en estudio, se procedió a modelar la cimentación, con la información según los planos existentes. Las rigideces dinámicas se asignaron en el centroide de cada zapata.

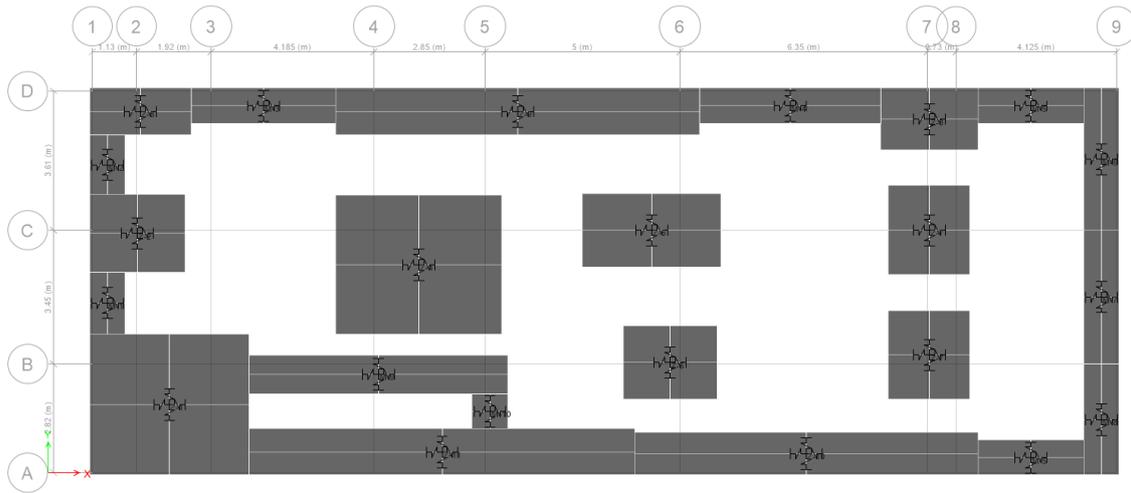


Figura 16. Asignación de rigideces en la cimentación.

Fuente: elaboración propia

En el modelo A (SIN ISE) se asignó propiedades mediante el modelado tradicional, es decir se asumió como si la base fuera rígida.

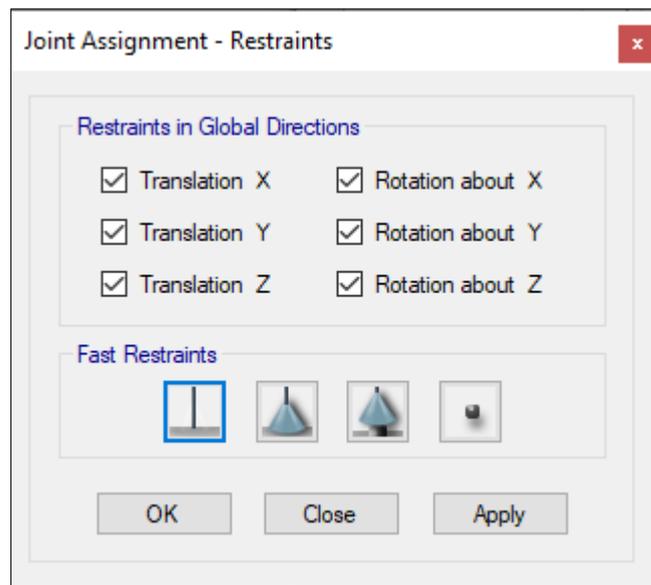


Figura 17. Asignación de base fija al modelo A.

Fuente: elaboración propia

Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

- Periodo fundamental

Tabla 18. Periodo fundamental para modelos sin considerar la ISE y considerando la ISE.

Tabla 19. Periodo fundamental de vibración

MODO	SIN ISE	CON ISE
1	0.404	0.404
2	0.242	0.244
3	0.064	0.065
4	0.046	0.046
5	0.039	0.039
6	0.038	0.039
7	0.024	0.024
8	0.023	0.023
9	0.016	0.016
10	0.014	0.014
11	0.014	0.014
12	0.012	0.012

Fuente: elaboración propia

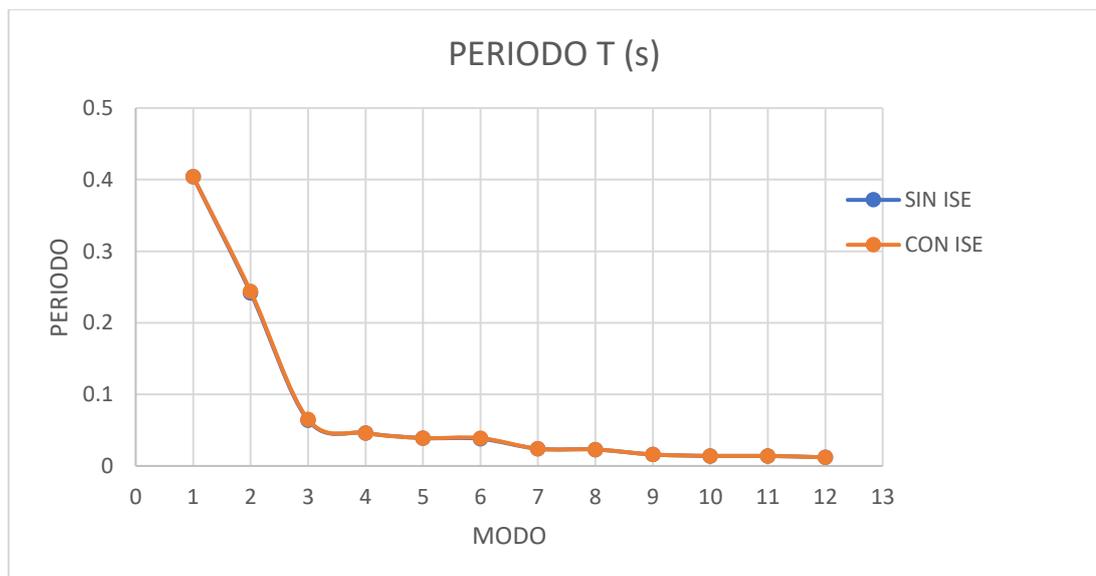


Figura 18. Periodo fundamental de vibración

Fuente: elaboración propia

Se interpreta de la figura que el periodo fundamental del edificio considerando la interacción suelo-estructura aumenta en 0.83% en el segundo modo de vibración respecto al modelo con base fija. Asimismo, se puede interpretar un aumento de 1.56% para el modo de vibración 3.

Desplazamiento lateral

- Desplazamiento lateral en dirección X

Tabla 20. Desplazamiento lateral en X-X

NIVEL	SIN ISE	CON ISE
7	3.60	3.62
6	3.14	3.17
5	2.66	2.69
4	2.17	2.21
3	1.68	1.72
2	1.21	1.26
1	0.75	0.79
-1	0.38	0.32
-2	0.21	0.17
-3	0.09	0.08

Fuente: elaboración propia

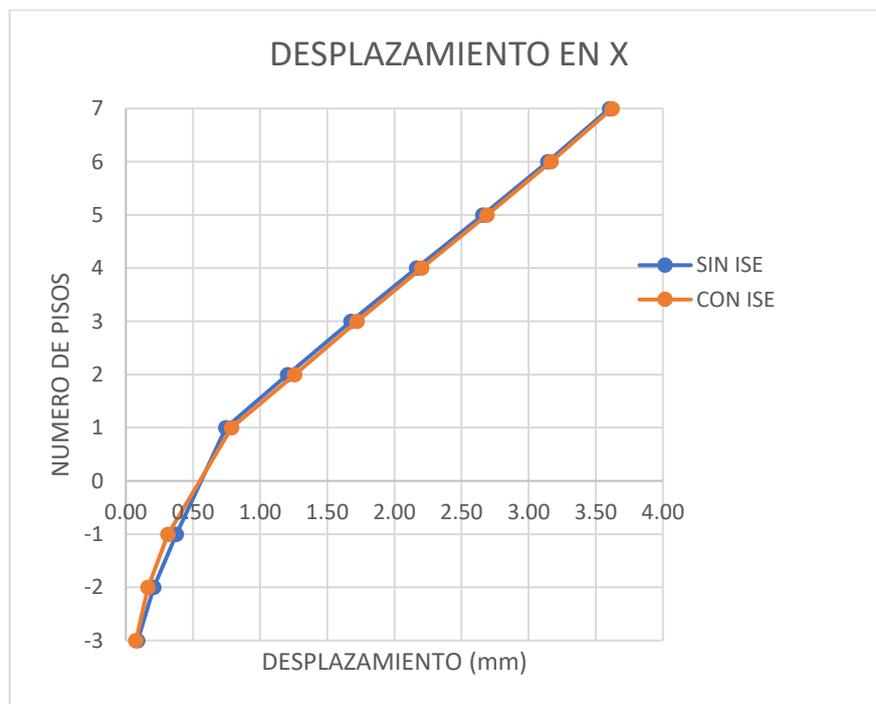


Figura 19. Desplazamiento lateral en X-X

Fuente: elaboración propia

Se interpreta que el desplazamiento lateral de un edificio de concreto armado con base deformable aumenta en 0.56% en la dirección x, respecto al modelo con base fija en el último nivel.

- Desplazamiento lateral en dirección Y

Tabla 21. Desplazamiento lateral en Y-Y

NIVEL	SIN ISE	CON ISE
7	5.82	5.76
6	5.238	5.175
5	4.526	4.465
4	3.696	3.64
3	2.801	2.732
2	1.939	1.786
1	1.079	0.882
-1	0.426	0.199
-2	0.225	0.109
-3	0.104	0.058

Fuente: elaboración propia

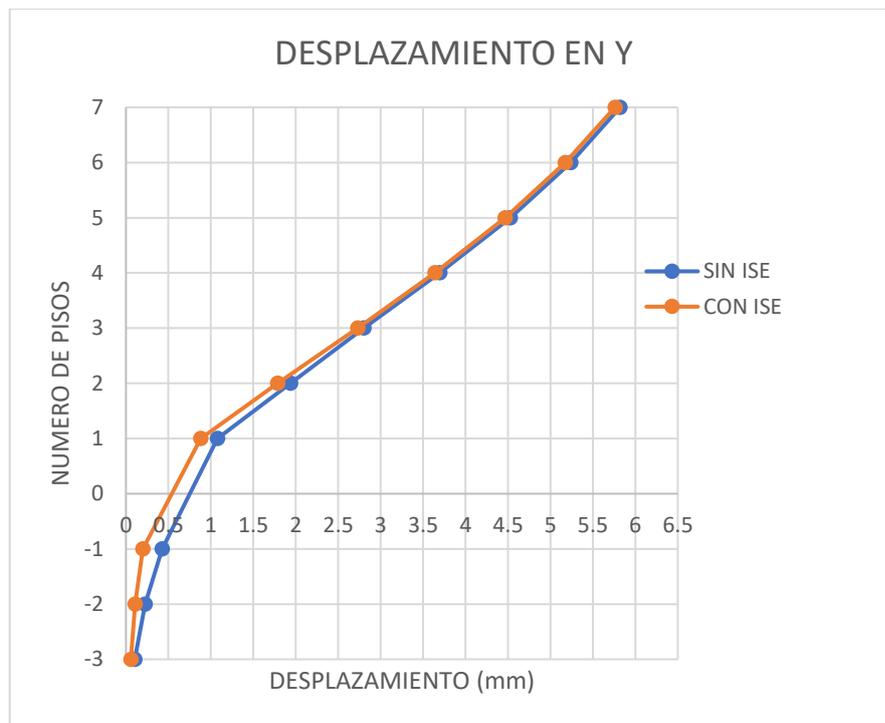


Figura 20. Desplazamiento lateral en Y-Y

Fuente: elaboración propia

Se interpreta que el desplazamiento lateral de un edificio de concreto armado con base deformable disminuye en 1.03% respecto al modelo con base fija en el último nivel.

Fuerza cortante

- Fuerza cortante en X

Tabla 22. Cortante en la base de cada nivel en dirección Y

NIVEL	SIN ISE	CON ISE
7	15.60	14.83
6	28.51	27.05
5	39.35	37.34
4	48.15	45.69
3	54.95	52.16
2	59.87	56.85
1	63.08	59.91
-1	65.38	26.63
-2	66.75	3.76
-3	67.35	8.40

Fuente: elaboración propia

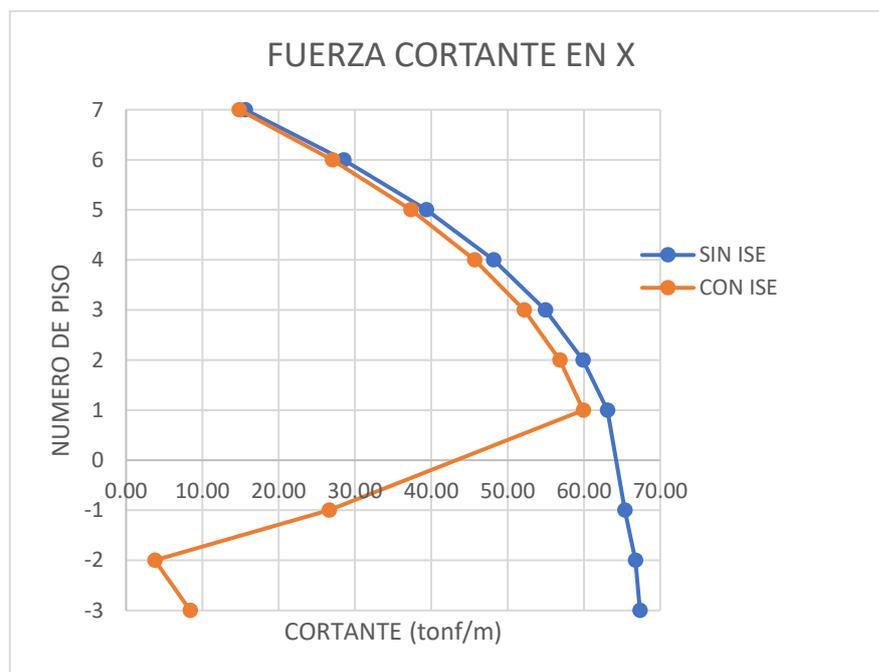


Figura 21. Fuerza cortante en dirección X-X

Fuente: elaboración propia

Se interpreta que la fuerza cortante en un edificio de concreto armado con base deformable (CON ISE) disminuye en 5.31% en el primer nivel, respecto al modelo de base fija (SIN ISE)

- Fuerza cortante en Y

Tabla 23. Cortante en la base de cada nivel en dirección Y

NIVEL	SIN ISE	CON ISE
7	11.2	10.3
6	18.81	17.57
5	24.39	22.95
4	28.62	27.11
3	32.31	30.82
2	35.77	34.1
1	38.56	36.15
-1	40.86	7.546
-2	42.68	8.824
-3	43.65	17.82

Fuente: elaboración propia

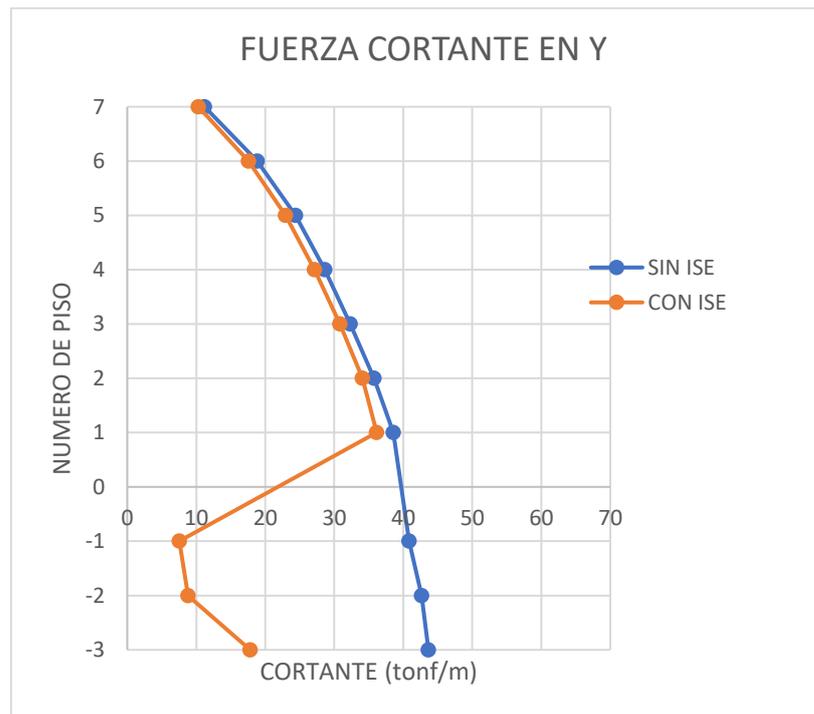


Figura 22. Fuerza cortante en dirección Y-Y

Fuente: elaboración propia

Se interpreta que la fuerza cortante en un edificio de concreto armado con base deformable (CON ISE) disminuye en 6.26% en el primer nivel, respecto al modelo de base fija (SIN ISE).

Derivas

- Derivas en dirección X

Tabla 24. Deriva de piso en cada nivel en dirección X

NIVEL	SIN ISE	CON ISE
7	0.001929	0.001932
6	0.001916	0.001919
5	0.001881	0.001883
4	0.001813	0.001816
3	0.001705	0.001708
2	0.001550	0.001554
1	0.001345	0.001348
-1	0.001085	0.001088
-2	0.000767	0.000771
-3	0.000304	0.000309

Fuente: elaboración propia

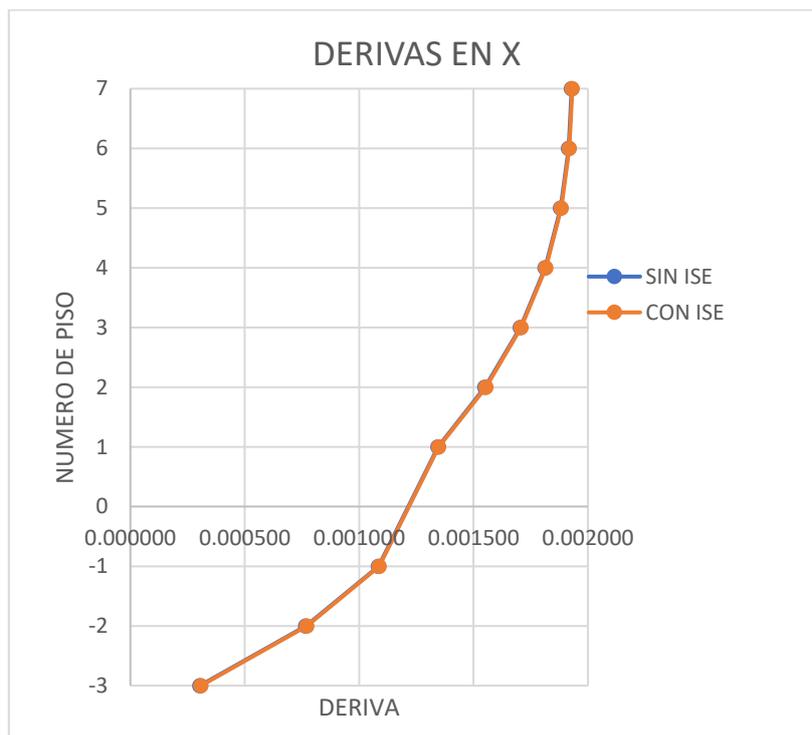


Figura 23. Deriva en dirección X-X

Fuente: elaboración propia

Se interpreta que la deriva en un edificio de concreto armado con base deformable (CON ISE) aumenta en 0.26% en el caso más desfavorable, respecto al modelo de base fija (SIN ISE)

Fuerza axial

- Fuerza axial en columna exterior

Tabla 25. Fuerza axial en la columna B-2

NIVEL	SIN ISE	CON ISE
7	0.88	0.89
6	3.43	3.43
5	6.29	6.28
4	9.53	9.48
3	13.02	12.09
2	16.51	16.33
1	20.20	20.00
-1	14.66	12.09
-2	10	9.43
-3	7.78	8.35

Fuente: elaboración propia

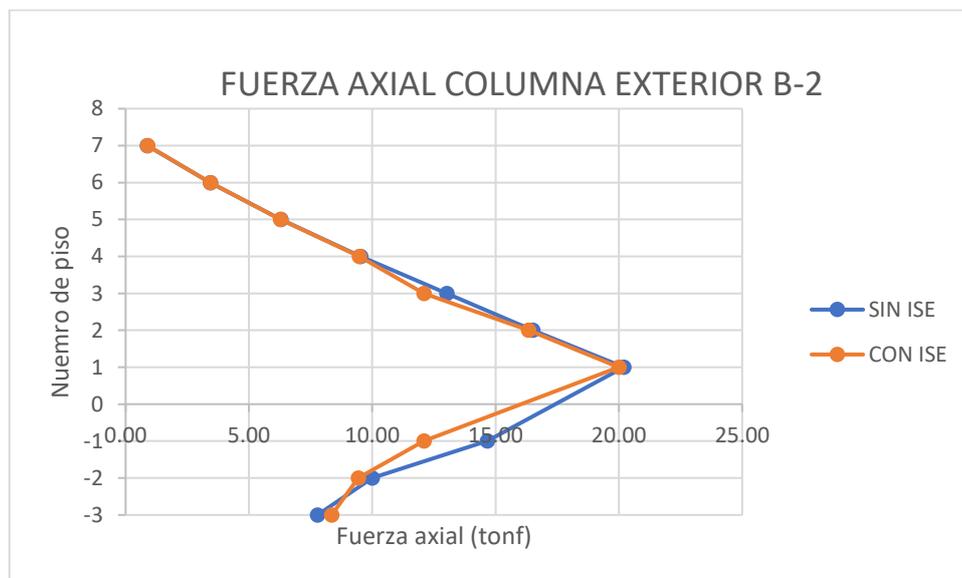


Figura 24. Fuerza axial en columna exterior B-2

Fuente: elaboración propia

Se interpreta que la fuerza axial de columnas exteriores en un edificio de concreto armado con base deformable (CON ISE) aumenta en 7.33% en el nivel inferior del tercer sótano, respecto al modelo de base fija (SIN ISE)

- Fuerza axial en columna exterior B-7

Tabla 26. Fuerza axial en la columna B-7

NIVEL	SIN ISE	CON ISE
7	2.54	2.55
6	5.63	5.54
5	8.62	8.38
4	11.50	11.08
3	14.17	13.61
2	16.67	16.14
1	19.47	19.52
-1	20.96	20.76
-2	21.95	21.97
-3	20.43	23.24

Fuente: elaboración propia

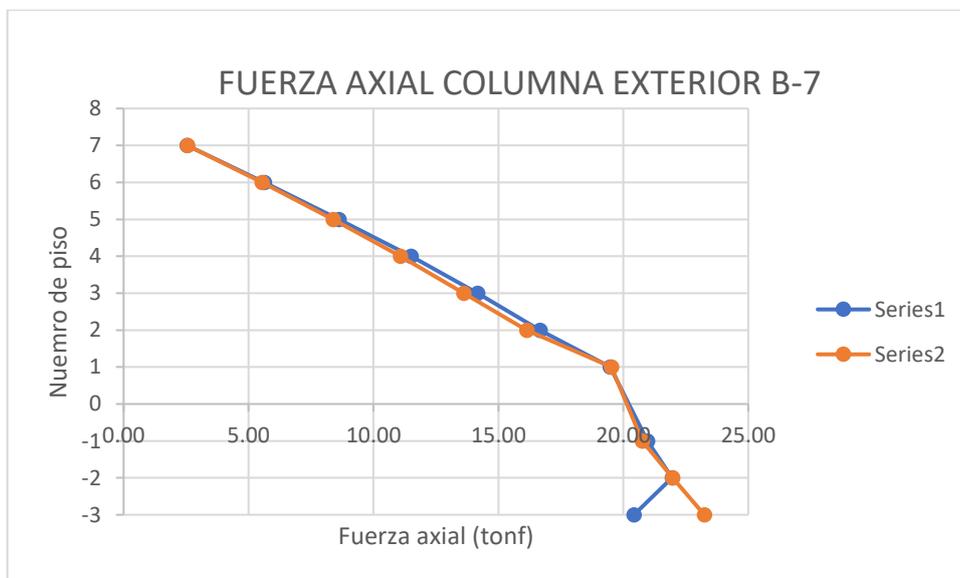


Figura 25. Fuerza axial en columna exterior B-7

Fuente: elaboración propia

Se interpreta que la fuerza axial de columnas exteriores en un edificio de concreto armado con base deformable (CON ISE) aumenta en 13.75% en el nivel inferior del tercer sótano, respecto al modelo de base fija (SIN ISE)

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

Curioso y Torres (2020) en la tesis “Influencia de la interacción suelo-estructura en edificaciones aporricadas (oficinas) de 4,8 y 12 pisos en perfiles de suelo S1, S2 y S3 de Lima – Perú bajo la normativa americana NIST GCR 12-917-21”. **Concluye** que el desplazamiento lateral en base deformable es mayor en 0.45% con respecto al modelo en base fija en un suelo tipo 1.

A comparación con la presente tesis el hallazgo muestra que el desplazamiento lateral de un edificio de concreto armado es mayor en 5.8% para el caso más desfavorable en un suelo tipo 1.

Ali, Faraj y Mohammed (2019) en el artículo “Seismic Behavior Analysis Considering Soil Structure Interaction of RC Multistory Buildings in Halabja City” **concluye** que el periodo fundamental de la estructura aumenta a medida que la rigidez del suelo disminuye.

En correlación con los resultados obtenidos por los investigadores antes mencionados, la presente tesis determina que el periodo fundamental aumenta en 0.83% para el segundo modo de vibración y 1.56% para el tercer modo, no se aprecia variación para el primer modo.

Chaudhari y Chopade (2018) “Performance Based Seismic Design of RC Building with Consideration of Soil Structure Interaction” **concluye** que la fuerza cortante de cada nivel disminuye a medida que la rigidez del suelo también disminuye.

En concordancia con Chaudhari y Chopade, esta investigación determinó que la fuerza cortante es menor en 5.40% en un edificio con base deformable respecto a uno con base fija, para el caso más desfavorable.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

1. La aplicación de la interacción suelo estructura a través de la metodología de la NIST GCR 12-917-21, muestra que la flexibilidad del suelo de fundación influye en los parámetros de respuesta estructural tales como, periodo de vibración, desplazamiento, fuerza cortante, fuerza axial y momento de volteo.
2. El desplazamiento lateral del último piso del edificio (azotea) no varía de manera considerable en el modelo de base deformable respecto al modelo de base fija.
3. La fuerza cortante en los modelos que considera la interacción suelo-estructura disminuye con respecto al modelo de base fija, lo que puede significar una reducción en los costos de construcción.
4. El momento de volteo en el modelo que considera la interacción suelo-estructura disminuyen, con relación a los casos donde se analiza con base fija, lo que significaría una reducción de costos de construcción.
5. En el modelo con base deformable, la fuerza axial en columnas exteriores disminuye, con relación al modelo de base fija, lo que significa que la estructura no fallaría por punzonamiento.

CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES

1. Se recomienda hacer una evaluación, además de modelo de base fija, el modelo con interacción suelo estructura pues los resultados demuestran cierta variación para un suelo tipo 1, ya que ello podría traer implicancias en el diseño de los elementos estructurales.
2. Se recomienda hacer evaluación considerando el amortiguamiento del suelo ya que ello podría representar mayores diferencias respecto al modelo de base fija, teniendo en cuenta el tamaño y forma del terreno de fundación.
3. Se recomienda hacer evaluación de la interacción suelo-estructura para los demás tipos de suelo, que son además más desfavorables respecto a su rigidez, es decir los tipos de suelo 2, 3 y 4.
4. Se recomienda hacer una evaluación de la Interacción suelo estructura para edificios menores a 10 pisos con 3 a más sótanos, ya que se ha evidenciado que, para edificios con esa cantidad de niveles, la influencia de la interacción suelo-estructura es mayor.
5. Se recomienda realizar un análisis pushover u otros similares donde se pueda evaluar el comportamiento de un edificio cuando se considere en conjunto la interacción suelo estructura y su comportamiento que tendría durante un sismo.

REFERENCIAS

ALFARO, G. y R. COPELLO. Comparativo de análisis estructural considerando interacción suelo- estructura (ISE) vs. empotrado, para un edificio de oficinas de 5 pisos, en la ciudad de Lima, con sistema dual, según la propuesta de norma E030-2014. Tesis (Título de ingeniero civil). Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2017. 324 pp. [fecha de consulta: 14 de abril de 2021]. Disponible en: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/622925>

ALI, H., FARAJ, R., y MOHAMMED K.K. Seismic Behavior Analysis Considering Soil Structure Interaction of RC Multistory Buildings in Halabja City", *Zanco Journal of Pure and Applied Sciences* [en línea]. Vol. 31, n.º3. 9 de agosto de 2019. [Fecha de consulta: 12 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://zancojournals.su.edu.krd/index.php/JPAS/article/view/3092>

ANNACHIARA, P., et al, 2020. Effects of Soil-Foundation-Structure Interaction on Fundamental Frequency and Radiation Damping Ratio of Historical Masonry Building Sub-Structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 03, vol. 18, no. 4, pp. 1187-1212. [Fecha de consulta: 28 de octubre de 2020]. ProQuest Central. ISSN 1570-761X. DOI <http://dx.doi.org/10.1007/s10518-019-00748-4>.

ATC 40. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. California: Applied Technology Council, 1996 [fecha de consulta: 10 de septiembre de 2020]. Disponible en: http://www.dinochen.com/attachments/month_0901/atc-402.pdf

ASCE/SEI 41-17; American Society of Civil Engineers. Structural engineering institute. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. Virginia, 2017. [fecha de consulta: 12 de septiembre de 2020]. Disponible en: <https://libgen.lc/ads.php?md5=C2394564329CD4BA166EC593459A0418> ISBN 9780784480816

BORJA, M. Metodología de la investigación científica para ingenieros [en línea]. Chilayo: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, 2015 [fecha de consulta: 19 de octubre de 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/33692697/Metodolog%C3%ADa_de_Investigaci%C3%B3n_Cient%C3%ADfica_para_ingenier%C3%ADa_Civil

BHURSE, P.S. y SANGHAI, S.S., 2019. Seismic Response of RC Building with and without Infill Walls Considering Nonlinearity of Soil. *I-Manager's Journal on Structural Engineering*, Junio, vol. 8, N°. 2, pp. 9-18. [Fecha de consulta: 17 de diciembre de 2020]. ProQuest Central. ISSN 22787887. DOI <http://dx.doi.org/10.26634/jste.8.2.15983>.

CARRASCO, K. Análisis comparativo entre el diseño estructural con el modelo sísmico normativo y los modelos dinámicos de interacción suelo- estructura para un edificio con pórticos y placas cimentado sobre zapatas aisladas. Tesis (Título de ingeniero civil). Piura: Universidad Nacional de Piura, 2019. 112 pp. [fecha de consulta: 03 de mayo de 2021]. Disponible en: <http://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/2204>

CHAUDHARI, D. y N. CHOPADE. Performance Based Seismic Design of RC Building with Consideration of Soil Structure Interaction. *Revista International Research Journal of Engineering and Technology* [en línea]. Mayo, 2018. Vol. 5, N°.5 [fecha de consulta: 5 de abril de 2021]. ISSN:2395-0056. Disponible en: <https://www.irjet.net/archives/V5/i5/IRJET-V5I5407.pdf>

CHOQUE, J. y LUQUE, E. Análisis estático no lineal y evaluación del desempeño sísmico de un edificio de 8 niveles diseñado con la norma e.030. Tesis (Ingeniero Civil). Arequipa: Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Facultad De Ingeniería Civil, 2019. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8866>

CHOQUE, C. y E. VILLANUEVA. Comparación dinámica modelo empotrado vs interacción suelo - estructura en una edificación con un Sistema Dual con platea de cimentación: caso Edificio Archivo Regional de Puno. Tesis (Título de ingeniero civil). Lima: Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, 2019. 236 pp. [fecha de consulta: 17 de abril de 2021]. Disponible en: <http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/4151>

CURIOSO, R. y A. TORRES. Influencia de la interacción suelo-estructura en edificaciones aporticadas (oficinas) de 4,8 y 12 pisos en perfiles de suelo S1, S2 y S3 de Lima – Perú bajo la normativa Americana NIST GCR 12-917-21. Tesis (Título de ingeniero civil). Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2020. 166 pp.

[fecha de consulta: 22 de abril de 2021]. Disponible en: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/653063>

DIAZ, J. y C, DIAZ. Evaluación de desempeño sísmico del hospital Regional de Lambayeque, ubicado en la provincia de Chiclayo, departamento Lambayeque. Tesis (Ingeniero civil). Lambayeque: Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo, Facultad de Ingeniería Civil, Sistemas y Arquitectura, 2020. Disponible en: <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/UNPRG/8411>

FEDERAL Emergency Management Agency (FEMA) [en línea]. A Practical Guide to Soil-Structure Interaction. California, 2020 [fecha de consulta: 21 de abril de 2021]. Disponible en: https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema_soil-structure-interaction.pdf

FEDERAL Emergency Management Agency (FEMA). Seismic Performance Assessment of Buildings. California 2012 [fecha de consulta: 21 de abril de 2021]. Disponible en: https://www.atcouncil.org/files/FEMAP-58-1_Volume%201_Methodology.pdf

FEMA 440. Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency, 2005 [fecha de consulta: 10 de septiembre del 2020]. Disponible en: <https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1445-20490-9603/fema-440.pdf>

FEMA 356. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency, 2000 [fecha de consulta: 10 de septiembre del 2020]. Disponible en: <https://www.conservationtech.com/FEMA-publications/FEMA356-2000.pdf>

FERNANDEZ, R. y R. ZAPATA. Análisis y diseño estructural de una torre de 40 pisos y 4 sótanos siguiendo normas peruanas incluyendo su desempeño sísmico en el distrito de Santiago de Surco, Lima. Tesis (Título de ingeniero civil). Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2019. 160 pp. [fecha de consulta: 14 de abril de 2021]. Disponible en: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/629954>

GAN, J., LI, P. and LIU, Q., 2020. Study on Dynamic Structure-Soil-Structure Interaction of Three Adjacent Tall Buildings Subjected to Seismic Loading. *Sustainability*, vol. 12, no. 1, pp. 336. [Fecha de consulta: 12 de abril de 2021] ProQuest Central. DOI <http://dx.doi.org/10.3390/su12010336>.

GIVENS, M. Dynamic Soil-Structure Interaction of Instrumented Buildings and Test Structures. Tesis (Doctor de filosofía en ingeniería civil). Los Ángeles: Universidad de California, 2013. 367 pp. [fecha de consulta: 3 de abril de 2021]. Disponible en: <https://escholarship.org/uc/item/3rh1w1hr>

HERNÁNDEZ, R., FERNÁNDEZ, C., y BAPTISTA, M. Metodología de la Investigación. 5.a ed. México: Interamericana Editores S.A., 2018, [fecha de consulta: 26 de octubre de 2020]. Disponible en: https://www.esup.edu.pe/descargas/dep_investigacion/Metodologia%20de%20la%20investigaci%C3%B3n%205ta%20Edici%C3%B3n.pdf. ISBN: 978-607-15-0291-9

HOKMABADI, A. y B, FATAHI. Influence of Foundation Type on Seismic Performance of Buildings Considering Soil–Structure Interaction. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. Vol. 16, N.º8. 13 de agosto de 2015. [Fecha de consulta: 13 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0219455415500431>

KHOUEIRY, D. y M. KHOURI. Integrating soil-structure interaction along basement walls in structural analysis programs. *Revista International Journal of Development Research* [en línea]. Abril, 2015. Vol. 5, Nº.04, 4061-4068 [fecha de consulta: 17 de abril de 2021]. ISSN: 2230-9926. Disponible en: <https://www.journalijdr.com/integrating-soil-structure-interaction-along-basement-walls-structural-analysis-programs>

KUMAR, P., SHARMA, S., y PANDEY, A.D., 2012. Effect of Soil-Structure Interaction on Building Response in Hilly Areas. *IUP Journal of Structural Engineering*, 10, vol. 5, no. 4, pp. 7-27. [Fecha de consulta: 06 de mayo de 2021] ProQuest Central. ISSN 09746528.

LEÓN, W.J.C., 2009. Estimación de los periodos naturales de vibración de viviendas de baja altura con muros de concreto. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*,

06, vol. 19, no. 1, pp. 39-54. [Fecha de consulta: 22 de mayo de 2021] ProQuest Central. ISSN 01248170.

MEDINA, R. y J. MUSIC. Determinación del nivel de desempeño de un edificio habitacional estructurado en base a muros de hormigón armado y diseñado según normativa chilena. *Obras y Proyectos* [en línea]. Vol. n.º23. 16 de abril de 2018. [Fecha de consulta: 14 de septiembre de 2020]. Disponible es: <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-28132018000100063>. ISSN 0718-2813

MORALES, L. y A. ESPINOSA. Influencia de la interacción suelo estructura (ISE) de cimentaciones superficiales en suelos no cohesivos en el comportamiento estructural de una edificación de 8 pisos y un subsuelo. *Revista Ingenio* [en línea]. Marzo, 2020. Vol.3, Nº.1 [fecha de consulta: 19 de abril de 2021]. ISSN: 2697-3243. Disponible en: <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/INGENIO/article/view/2391>

NATIONAL Institute of Standards and Technology (NIST). Soil-Structure Interaction for Building Structures. California 2012 [fecha de consulta: 21 de abril de 2021]. Disponible en: <https://www.nehrp.gov/pdf/nistgcr12-917-21.pdf>

NEYRA, C. y G. ROMERO. Influencia de la interacción suelo-estructura en el análisis sísmico en edificaciones aporticadas sobre zapatas aisladas debido al cambio de geometría y condiciones geotécnicas. Tesis (Título de ingeniero civil). Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2019. 102 pp. [fecha de consulta: 14 de abril de 2021]. Disponible en: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/626581>

NORMA E.030 Diseño sismorresistente. Reglamento Nacional de Edificaciones [en línea]. Lima: El Peruano, 2018 [fecha de consulta: 8 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://page.sencico.gob.pe/publicaciones.php?id=230>

O'REILLY, G. Performance-Based Seismic Assessment and Retrofit of Existing RC Frame Buildings in Italy. Tesis (Título de Doctor en Filosofía). Italia: Scuola Universitaria Superiore IUSS Pavia, 2016. 477 pp. [fecha de consulta: 15 de noviembre de 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/317746246_Performance-

Based Seismic Assessment and Retrofit of Existing RC Frame Buildings in Italy

OJEDA, J. y J. LOPEZ. Desempeño sísmico de una edificación de concreto armado dual mediante el análisis no lineal en el tiempo ubicado en el distrito de Lince, departamento de Lima-Perú. Tesis (Título de ingeniero civil). Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2021. 181 pp. [fecha de consulta: 17 de abril de 2021]. Disponible en:

<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/655183>

OZ, I. et al. Effect of Soil-Structure Interaction on the Seismic Response of Existing Low and Mid-Rise RC Buildings. *Revista ciencias aplicadas* [en línea]. Noviembre, 2020. Vol.10, N°.23 [fecha de consulta: 05 de abril de 2021]. Disponible en:

<https://www.mdpi.com/2076-3417/10/23/8357>

SAAD, G., SADDIK, F. y NAJJAR, S. Impact of Soil Structure Interaction on the Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings with Underground Stories [en línea]. En: Conferencia Mundial sobre Ingeniería Sísmica (15º: 2012: Lisboa). Ponencia [21 de abril de 2021]. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/265499369_Impact_of_Soil_Structure_Interaction_on_the_Seismic_Design_of_Reinforced_Concrete_Buildings_with_Underground_Stories

SUN, S., et al, 2021. Dynamic Performance Analysis of Ancient Buildings Based on Soil-Structure Interaction. IOP Conference Series.Earth and Environmental Science, 04, vol. 719, no. 2. [Fecha de consulta: 09 de noviembre de 2020] ProQuest Central. ISSN 17551307. DOI <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/719/2/022010>.

PINTO, F y C. LEDEZMA. Interacción suelo-estructura en edificios de gran altura con subterráneos en Santiago, Chile. *Revista Obras y Proyectos* [en línea]. Marzo, 2019. N°.25 [fecha de consulta: 9 de abril de 2021]. ISSN: 0718-2813. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132019000100066>

ULITSKY, V., LISYUK, M., y SHASHKIN, A. Soil-structure interaction, underground structures and retaining walls [en Línea]. En: International Conference on Geotechnical Engineering (4º: 2014: San Petersburgo). Libro [fecha de consulta: 10

de abril de 2021]. Disponible en:
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.949.1310&rep=rep1&type=pdf>

VARA, A. 7 pasos para una tesis exitosa. 3. ed. Lima, 2017 [fecha de consulta: 20 de octubre de 2020]. Disponible en:
<https://www.administracion.usmp.edu.pe/investigacion/files/7-PASOS-PARA-UNA-TESIS-EXITOSA-Desde-la-idea-inicial-hasta-la-sustentaci%C3%B3n.pdf>

VILLAREAL, G. Interacción suelo estructura en edificaciones con zapatas aisladas. *Revista internacional de ingeniería de estructuras* [en línea]. Vol. 25, n.º3. 1 de julio de 2020. [Fecha de consulta: 21 de septiembre de 2020]. Disponible en:
<https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/riie/article/view/1689>

XIONG, W., JIANG, L. and LI, Y., 2016. Influence of Soil-Structure Interaction (Structure-to-Soil Relative Stiffness and Mass Ratio) on the Fundamental Period of Buildings: Experimental Observation and Analytical Verification. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 01, vol. 14, no. 1, pp. 139-160. [Fecha de consulta: 20 de abril de 2021]. ProQuest Central. ISSN 1570-761X. DOI <http://dx.doi.org/10.1007/s10518-015-9814-2>.

ZEEVAERT, L. *Interacción suelo-estructura de cimentaciones superficiales y profundas, sujetas a cargas estáticas y sísmicas* [en línea]. 1.ª ed. México D.F. Editorial Limusa S.A. 1980. 265 pp. [fecha de consulta: 10 de abril de 2021]. ISBN 968-18-1237-9. Disponible en:
<https://mega.nz/file/4D5SVT6R#sy3gew1nSCv7EgCJZvi2VjvXf8njeOQ96kqvHwxypr4>

ANEXOS

ANEXO 1: MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLES DE ESTUDIO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
Variable independiente (X) Interacción suelo-estructura	La interacción suelo-estructura por otro lado considera una base flexible, generándose así esfuerzos de entrada de un sismo más reales, es decir, existe alteración en el movimiento del suelo de fundación debido a la presencia de la estructura (Morales L. y Espinosa A, 2020).	Se evaluará un prototipo de estructura sin considerar la ISS, y otro modelo considerando la ISS, teniendo en cuenta la forma y tipo de la cimentación.	Flexibilidad del suelo	Densidad del suelo	Razón
				Angulo de fricción interna del suelo	Razón
				Módulo de elasticidad suelo	Razón
			Coeficientes de interacción	Rigidez dinámica	Razón
				Modificador de empotramiento	Razón
				Modificador de rigidez	Razón
Variable dependiente (Y) Desempeño sísmico	La ingeniería sísmica basada en desempeño (Performance-Based Earthquake Engineering, PBEE), es un proceso que se inicia con el planteamiento de concepción de un proyecto, regida por diversas metodologías, criterios, normas, etc. que nos permitirán diseñar una estructura capaz de resistir la acción sísmica sin colapsar o poner en peligro la seguridad de vida de sus ocupantes (Diaz, L. y Diaz, R., 2020)	El edificio será evaluado mediante el nivel de desempeño, los objetivos de desempeño, el punto de desempeño y daño.	Análisis sísmico	Análisis estático	Razón
				Análisis dinámico modal espectral	Razón
			Respuesta estructural	Periodo de vibración	Razón
				Desplazamiento lateral	Razón
				Fuerza cortante	Razón
				Fuerza axial	Razón

ANEXO 2. MATRIZ DE CONSISTENCIA

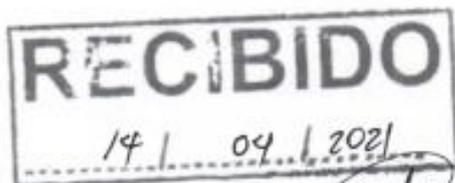
TÍTULO: Evaluación del desempeño sísmico de un edificio de concreto armado considerando los efectos de la interacción suelo-estructura, Lima, 2020”.

AUTOR: Henry Alván Bravo Montoya

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	INSTRUMENTOS		
<p>Problema general ¿Cuál es la influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño sísmico de un edificio de concreto armado, Lima, 2021?</p> <p>Problemas específicos ¿Cuál es la influencia de la interacción suelo-estructura en el periodo fundamental de un edificio de concreto armado, Lima, 2021? ¿Cuál es la influencia de la interacción suelo-estructura en desplazamiento lateral de un edificio de concreto armado, Lima, 2021? ¿Cuál es la influencia de la interacción suelo-estructura, en la fuerza cortante de un edificio de concreto armado, Lima, 2021? ¿Cuál es la influencia de la interacción suelo-estructura, en la fuerza axial de columnas exteriores de un edificio de concreto armado, Lima, 2021?</p>	<p>Objetivo general Evaluar la influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño sísmico de un edificio de concreto armado, Lima, 2021.</p> <p>Objetivos específicos Determinar la influencia de la interacción suelo-estructura en el periodo fundamental de un edificio de concreto armado, Lima, 2021. Determinar la influencia de la ISE en el desplazamiento lateral de un edificio de concreto armado, Lima, 2021. Determinar la influencia de la interacción suelo-estructura, en la fuerza cortante de un edificio de concreto armado, Lima, 2021. Determinar la influencia de la interacción suelo-estructura, en la fuerza axial de columnas exteriores de un edificio de concreto armado, Lima, 2021.</p>	<p>Hipótesis general La interacción suelo-estructura influye considerablemente en el desempeño sísmico de un edificio de concreto armado, Lima, 2021.</p> <p>Hipótesis específicas La interacción suelo-estructura aumenta el periodo de vibración de un edificio de concreto armado, Lima, 2021 El desplazamiento lateral de un edificio de concreto armado aumenta debido a la interacción suelo-estructura, Lima, 2021. La interacción suelo-estructura, aumenta la fuerza cortante en un edificio de concreto armado, Lima, 2021. La interacción suelo-estructura aumenta la fuerza axial de columnas exteriores un edificio de concreto armado, Lima, 2021.</p>	<p>Variable independiente (X) Interacción suelo-estructura</p>	<p>Flexibilidad del suelo</p>	Módulo de Poisson	Estudio de Mecánica de Suelos		
					Velocidad de onda sísmica	Estudio de Mecánica de Suelos		
					Módulo de elasticidad suelo	Estudio de Mecánica de Suelos		
			<p>Variable dependiente (Y) Desempeño sísmico</p>	<p>Funciones de impedancia</p>	Rigidez dinámica	NIST GCR 12-917-21		
					Modificador de empotramiento	NIST GCR 12-917-21		
					Modificador de rigidez	NIST GCR 12-917-21		
					<p>Análisis sísmico</p>	Análisis estático	E.030	
						Análisis dinámico modal espectral	E.030	
						<p>Respuesta estructural</p>	Periodo de vibración	E.030, ETABS V19
							Desplazamiento lateral	E.030, ETABS V19
Fuerza cortante	E.030, ETABS V19							
Fuerza axial	E.030, ETABS V19							

ANEXO 3: Solicitud de la información

AÑO DEL BICENTENARIO DEL PERU: 200 AÑOS DE INDEPENDENCIA



SOLICITO: PLANOS DE ESTRUCTURAS Y ESTUDIO DE SUELO DE "EDIFICIO DE OFICINAS 7 PISOS Y 3 SÓTANOS" CON FINES DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA.

Señor:

ING. JOEN BAZAN ARBILDO

Proyectista del "Edificio de Oficinas de 7 pisos y 3 sótanos"

Presente. -

Yo, **HENRY ALVÁN BRAVO MONTOYA** identificado con DNI N.º 48027561, de nacionalidad peruana con domicilio en Calle Fernández Pinillos Mz-N1-Lt.20 Distrito de Independencia, Provincia y Departamento de Lima, Teléfono +51 956 432 716, correo electrónico brmontoya@gmail.com, en calidad **ESTUDIANTE DE INGENIERÍA CIVIL** de la **UNIVERSIDAD CESAR VALLEJO** de la Escuela de Ingeniería Civil con código de alumno 7000725238, respetuosamente ante usted expongo.

Solicito se me otorgue una autorización para realizar investigación científica, por ende, me facilite los planos de estructuras y el estudio de suelos a fin de utilizarlos como parte de la tesis "**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO SISMICO DE UN EIFICIO DE CONCRETO ARMADO CONSIDERANDO LOS EFECTOS DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA, LIMA, 2021**".

Por lo expuesto, agradeceré a usted acceder lo solicitado.

Lima 13 de abril de 2021



HENRY BRAVO MONTOYA

Firma

ANEXO 4: Autorización para el uso de la información

AÑO DEL BICENTENARIO DEL PERU: 200 AÑOS DE INDEPENDENCIA

Lima 20 de abril de 2021

Señor:

HENRY ALVAN BRAVO MONTOYA

Presente. -

En respuesta a,

SOLICITUD: PLANOS DE ESTRUCTURAS Y ESTUDIO DE SUELOS DEL EDIFICIO DE OFICINAS 7 PISOS Y 3 SÓTANOS.

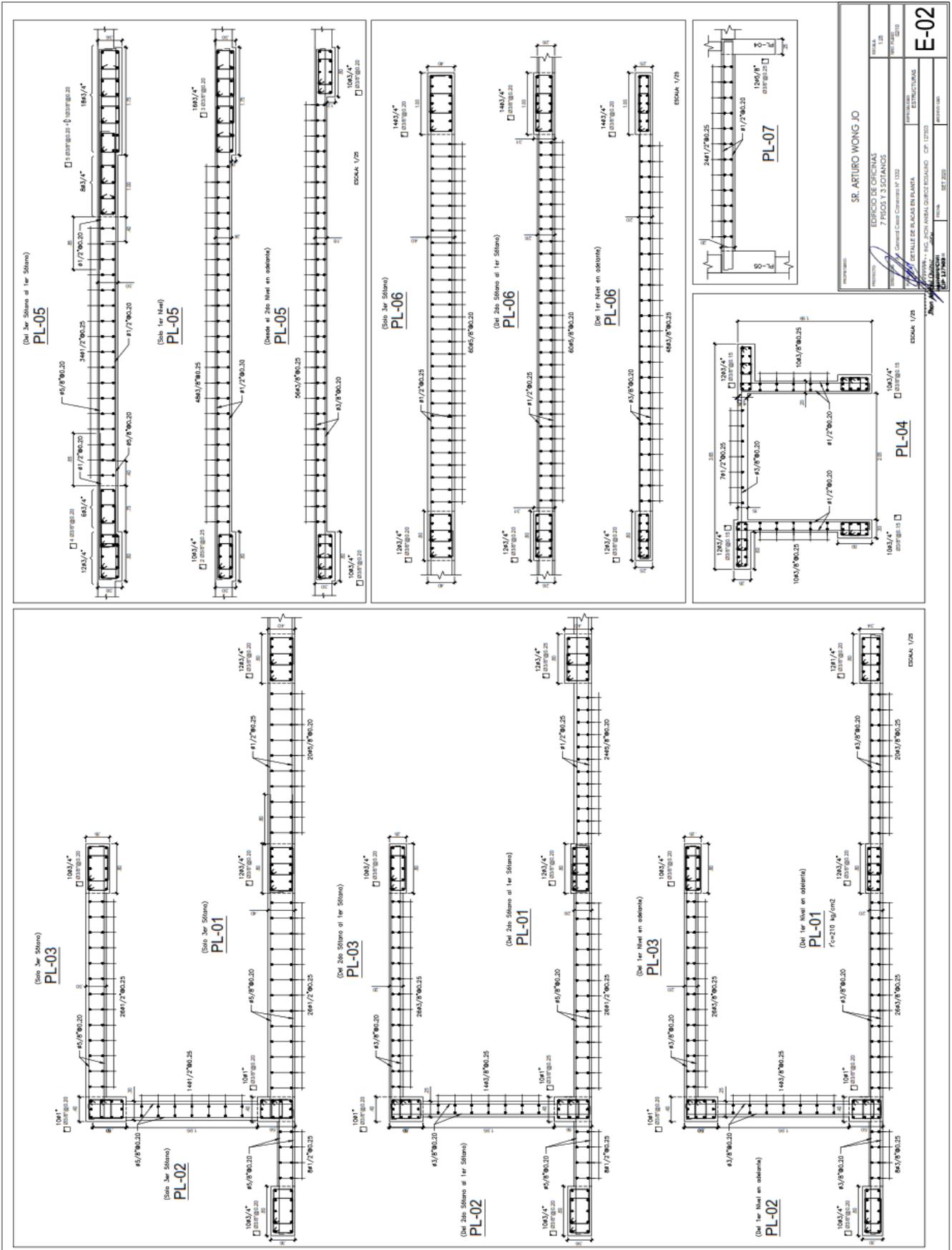
Yo, **JOEN BAZAN ARBILDO**, con DNI 26717649 **AUTORIZO** al señor **HENRY ALVAN BRAVO MONTOYA** realizar investigación científica con la información solicitada, por ende se le otorga copia digital de los planos de estructuras en formato .dwg y el estudio de suelo en formato .pdf, los mismo que se enviaran al correo brindado, para que el interesado pueda utilizarlo como parte de la tesis "**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO SISMICO DE UN EIFICIO DE CONCRETO ARMADO CONSIDERANDO LOS EFECTOS DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA, LIMA, 2021**".

Atentamente.



BAZAN ARBIDO JOEN EDUARDO
CIP:74440

ANEXO 6: Planta Placas



ANEXO 7: Planta Placas

