

Influencia Del Modelo Numérico De La Cimentación En Estructuras Aporticadas De Hormigón Armado

Influence of the Numerical Model of the Foundation in Framed Structures of Reinforced Concrete

Autores

Stalin Alcívar Moreira¹, Yordy Mieles Bravo², Gian Pierre Mosquera³

¹ Master Ingeniería Estructural y Geotécnica por la Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo-Ecuador, E-mail: william.alcivar@utm.edu.ec

² Doctor en Ciencias Técnicas por la Universidad Tecnológica de La Habana, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo-Ecuador, E-mail: yordy.mieles@utm.edu.ec

³ Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Manabí, E-mail: gmosquera9316@utm.edu.ec

RESUMEN

Debido a la incertidumbre asociada al modelo numérico de la cimentación a las estructuras se las analiza considerando empotramiento perfecto entre el suelo y la base de las columnas, tal modelo no se aproxima a la realidad ya que el suelo no posee rigidez infinita. Cuando la condición de empotramiento perfecto no se cumple, los desplazamientos adicionales que producen en la base de la fundación inducen un comportamiento distinto al esperado para la estructura empotrada. Adicional a esto, existen diferentes criterios sobre el nivel en que se debe considerar el empotramiento, y en caso de que se incorpore la rigidez, traslacional o rotacional, del suelo en los análisis existen diferentes alternativas o metodologías para estimar estas rigideces. Modelos computacionales de este trabajo indican que la interacción suelo-estructura afecta directamente al comportamiento dinámico de las estructuras. Se acepta la modelación con empotramientos en la base, sin embargo, se recomienda incorporar la rigidez del suelo. Se recomienda emplear el módulo de rigidez del suelo pues tiene influencia en las derivas de piso.

Palabras claves: Interacción suelo-estructura, módulo de rigidez del suelo, cimentaciones, análisis Estructural.

ABSTRACT

Due to the uncertainty associated with the numerical model of the foundation to the structures, they are analyzed considering perfect embedment between the ground and the base of the columns, such a model does not approach reality since the ground does not have infinite stiffness. When the perfect embedment condition is not met, the additional displacements that occur at the base of the foundation induce a different behavior than expected for the embedded structure. In addition to this, there are different criteria on the level at which embedment should be considered, and if the translational or rotational stiffness of the soil is incorporated into the analysis, there are different alternatives or methodologies to estimate these stiffnesses. Computational models of this work indicate that the soil-structure interaction directly affects the dynamic behavior of the structures. Modeling with embedment at the base is accepted, however, it is recommended to incorporate the stiffness of the soil. It is recommended to use the soil stiffness modulus as it influences floor drifts.

Keywords: Soil-structure interaction, soil stiffness modulus, foundations, structural analysis.

Nota Editorial: Recibido: Agosto 2022 Aceptado: Septiembre 2022

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es evaluar la influencia de la modelación de la cimentación y la interacción suelo-estructura en los análisis sísmicos de estructuras aporticadas de hormigón armado. Para este fin, se analiza las propiedades dinámicas, periodos y modos de vibración, los esfuerzos globales y los desplazamientos laterales ante cargas sísmicas, al considerar de diversas formas de incluir la rigidez del suelo y la cimentación en los análisis sísmicos. En la actualidad la mayoría de diseños estructurales son analizados bajo el sistema de empotramiento entre el suelo y las columnas, a pesar de que se puede realizar el análisis considerando la interacción suelo-estructura para incluir los asentamientos y desplazamientos laterales de las cimentaciones. Trabajar con la base empotrada no es un caso real ya que el suelo no es completamente rígido y este influye en los modos de vibración y distribución de esfuerzo de la estructura cambiando así las fuerzas internas de la misma.

Al considerar el efecto de la interacción suelo-estructura esta interviene en la determinación de periodos de vibración de la estructura, desplazamientos, en los esfuerzos y por consiguiente en su diseño estructural. En estructuras cimentadas sobre roca el efecto de la interacción suelo-estructura no tiene mucha relevancia, por lo que en la presente investigación se analizarán 4 modelos matemáticos en los que se modificó la condición de apoyo los cuales son: i) con empotramiento en la base, ii) sobre apoyos fijos, iii) con empotramiento a nivel de cimentación considerando las vigas de arriostramiento a nivel de piso, iv) modelo empotrado a nivel de piso. Además, se analizó 4 modelos que incorporen la interacción suelo-estructura como: i) resortes puntuales del FEMA 356, ii) resortes que consideran el uso de coeficientes de rigidez del suelo aplicados a elementos tipo área, iii) resortes puntuales usando módulo de rigidez del suelo, y iv) según el NEHRP donde se empleó el uso de la herramienta *Isolated Column Footing* que viene incorporado en el programa ETABS para la interacción suelo-estructura. Se emplea el software ETABS debido a que contiene las opciones para incorporar la interacción del suelo en forma de resortes lineales o como área, cuya rigidez está en función del coeficiente de rigidez del suelo o módulo de balasto. El software ha demostrado estabilidad y buenos resultados en distintos modelos de interacción suelo estructura con el uso de resortes en la modelación [1, 2].

2. EFECTOS DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA SOBRE LAS EDIFICACIONES

La interacción suelo-estructura consiste en un conjunto de efectos cinemáticos e inerciales producidos en la estructura y el suelo como resultado de la deformabilidad ante la excitación sísmica. La interacción modifica las propiedades dinámicas relevantes que tendría la estructura supuesta con base indeformable, así como las características del movimiento del suelo en la cercanía de la cimentación [3]. Al considerar el efecto de la interacción suelo-estructura, interviene la determinación de periodos de vibración de la estructura, desplazamientos, en los esfuerzos y por consiguiente en los resultados de su diseño estructural [4].

Los modelos convencionales para representar la interacción entre el suelo y la estructura, consideran las distintas condiciones de apoyo. En ciertos casos al agregar flexibilidad a la base de la estructura se tiene incremento de deformaciones y en otros casos se obtiene reducción de fuerzas, esto quiere decir que los modelos de base rígida funcionan para ciertos casos dado que hay estructuras analizadas y diseñadas por las formas convencionales que han soportado fuerzas sísmicas de gran magnitud [5]. En la figura 1-a, se presenta el modelado de apoyos fijos en la base de las columnas; es típico para marcos que no se extienden a través de pisos por debajo del nivel, esta suposición da como resultado la restricción de base de columna más flexible, la alta flexibilidad alarga el periodo del edificio, lo que da como resultado un cortante de base menor, pero a su vez derivas de piso más grandes. Un inconveniente de esta condición, es difícil de mantener la deriva del piso inferior dentro de los límites permitidos en los códigos de diseño.

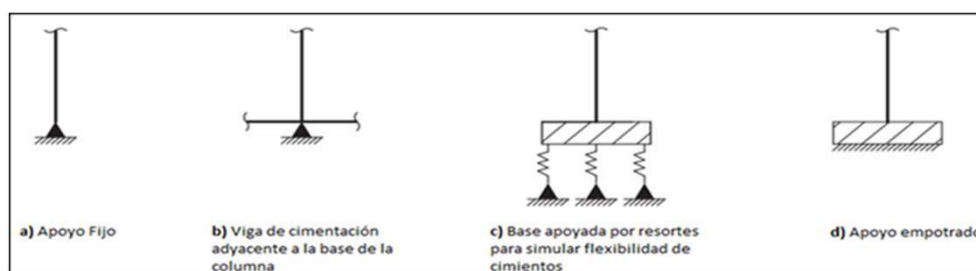


Figura 1: Condiciones de restricción en la base de la columna [5].

2.1. Rigidez y amortiguamiento de la cimentación

La inercia desarrollada en una estructura vibratoria favorece al desarrollo de fuerzas cortantes de base, momentos flectores y torsión. Estas fuerzas generan desplazamientos y rotaciones en la interfaz suelo–cimentación. Estos desplazamientos y rotaciones son posibles debido a la flexibilidad del sistema, la cual contribuye de forma significativa a la flexibilidad de todo el sistema estructural incrementado adicionalmente el periodo de vibración de la edificación [6, 7]. Adicionalmente, tales desplazamientos favorecen los procesos de disipación de energía mediante amortiguamiento por radiación y amortiguación debido al comportamiento histerético del suelo, el cual puede modificar de forma integral el amortiguamiento total del sistema [6]. Debido a que estos efectos poseen su origen en el comportamiento inercial de la estructura, se les define como interacción inercial.

2.2. Variación entre el movimiento de entrada en la cimentación y el movimiento en condición de campo libre

Los movimientos de entrada a la cimentación y los movimientos en condición de campo libre pueden diferir debido a: Interacción cinemática, en la cual la rigidez de los componentes del sistema de cimentación ubicados en la superficie o por debajo de la superficie del terreno ocasionan movimientos en la cimentación que son diferentes de los movimientos en campo libre debido al promedio de onda en la base de la cimentación, propagación de ondas y efectos de embebido en ausencia de la estructura e inercia de la cimentación [8].

2.3. Deformaciones de la cimentación

Las deformaciones por flexión, carga axial, y cortante de los elementos estructurales de la cimentación ocurren debido a la aplicación de fuerzas y deformaciones por parte de la estructura y el terreno, esto representa la demanda sísmica para la cual deben ser diseñados los elementos de la cimentación, y tales demandas pueden ser significativas especialmente para cimentaciones flexibles tales como losas y pilotes [9].

3. MODELOS MATEMÁTICOS A EVALUAR

Se modeló una estructura para su análisis y se le añadió la cimentación considerando variaciones para modelarla e incorporarla a los análisis sísmicos tanto estáticos como dinámicos a fin de comparar los resultados de los diferentes análisis. Para la evaluación del comportamiento de las estructuras ante diferentes formas de modelar la cimentación, se eligió un tipo de suelo, una capacidad portante y a partir de estos los parámetros de rigidez a nivel de la cimentación.

Fueron ocho en total las estructuras analizadas, todas parten de la estructura que aparece en la guía de diseño de hormigón armado de la Norma Ecuatoriana de la Construcción – Hormigón Armado (NEC-SE-HM 2015) [10]. La estructura cuenta con una superficie aproximada de 324 m², la altura del primer piso es de 4,2 m mientras que la altura de los pisos segundo y tercero es de 3,0 m. La luz entre ejes de 6 m. La figura 2 muestra una vista tridimensional del modelo considerando empotramiento en la base de las columnas.

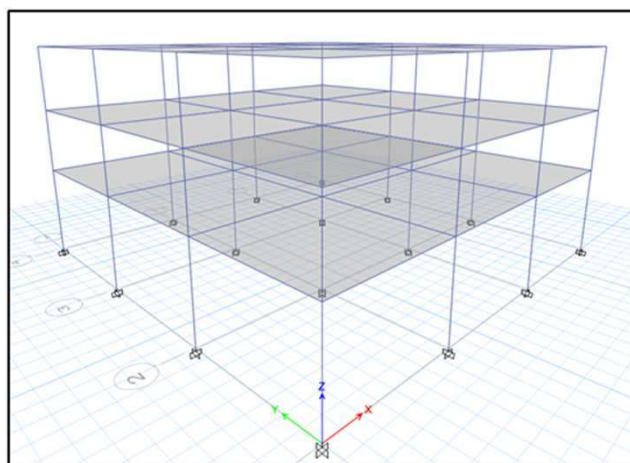


Figura 2: Modelo empotrado a nivel de cimentación.

El sistema estructural es un sistema aporticado de hormigón armado, la sección de las columnas es de 0,50 m por 0,50 m, y la de las vigas de 0,30 m de base por 0,50 m de altura. Se usó losas alivianadas de 0,25 m, se consideraron las siguientes características de materiales: para el hormigón se usó una resistencia a la compresión de $f'_c = 24 \text{ MPa}$, módulo de elasticidad $E_c = 23473 \text{ MPa}$ y para el acero se utilizó una resistencia a la fluencia de $F_y = 420 \text{ MPa}$.

La estructura no presenta irregularidades en planta ni en elevación, se empleó en el análisis modal espectral los espectros definidos por Norma Ecuatoriana de la Construcción de Diseño Sísmico (NEC-SE-DS-2015) [11], para suelo tipo D y zona sísmica VI. El coeficiente de importancia $I = 1$ y el factor de reducción de resistencia sísmica, $R = 8$. El suelo que se consideró para el análisis y determinación de los parámetros de rigidez es arcilla blanda típico de la zona céntrica de la ciudad de Portoviejo.

Sobre las losas de entrepiso se colocó una carga permanente de $3,3 \text{ kN/m}^2$ y una carga viva de 2 kN/m^2 . Para la losa del último nivel no se consideró carga de mampostería, pero se añade una sobre carga permanente de $1,32 \text{ kN/m}^2$ y una carga viva normativa de $0,70 \text{ kN/m}^2$ (NEC-SE-CG-2015) [12]. Para el análisis modal espectral se utilizó el espectro de respuesta inelástico con una carga reactiva sísmica igual al 100% de las cargas muertas más el 25% de la carga viva; se incorporó también el análisis sísmico estático que prescrito en NEC-SE-DS [11].

3.1. Modelo con apoyos fijos

Se empleó la condición de que está apoyado en el suelo donde se restringen los desplazamientos en los tres ejes principales y se liberan las restricciones en los ejes rotacionales (ver la figura 3).

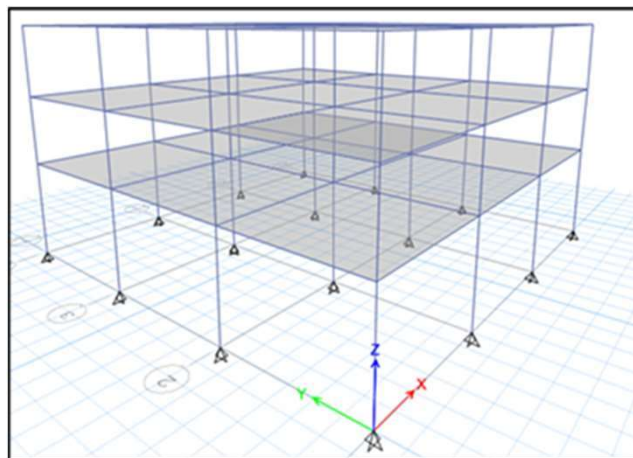


Figura 3: Modelo con apoyos fijos en la base.

3.2. Modelo con base empotrada incorporando vigas de amarre a nivel de contrapiso.

Con el fin de analizar un modelo más parecido a las construcciones típicas en el Ecuador, este modelo considera empotramiento en la base y se modela además unas vigas de amarre con secciones de 0,30 m por 0,45 m con una profundidad de desplante 1,2 m (ver la figura 4).

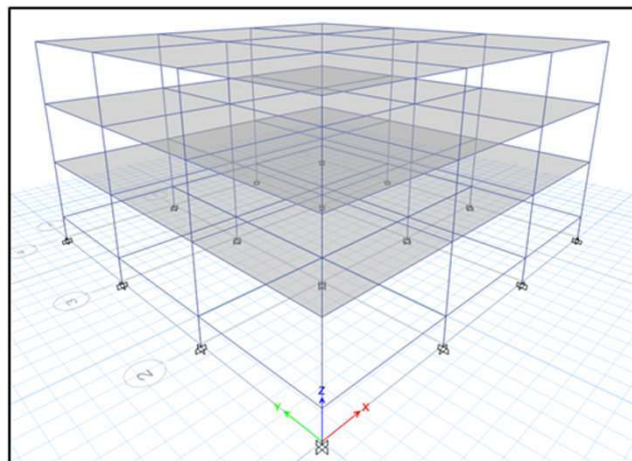


Figura 4: Modelo con base empotrada incorporando vigas de amarre a nivel de contrapiso.

3.3. Modelo con base empotrada a nivel de contrapiso.

Para este análisis se elimina la profundidad de la cimentación tomando como altura de columnas la altura desde el nivel de contrapiso, quedando una altura típica de 3 metros en todos los niveles (ver la figura 5).

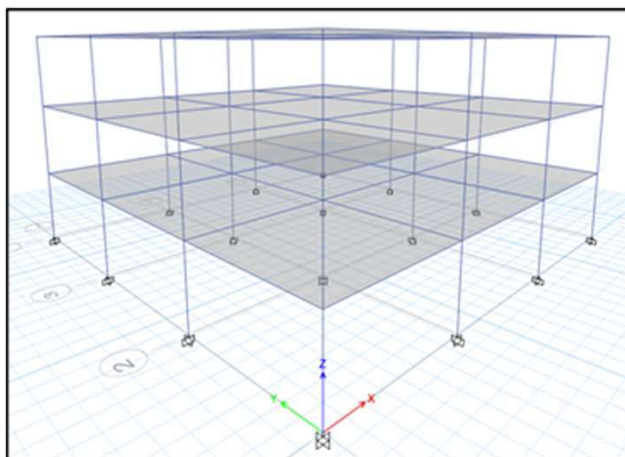


Figura 5: Modelo con base empotrada a nivel de contrapiso

3.4. Modelo con resortes de área empleando el coeficiente de balasto.

Para modelar la rigidez que aporta el suelo a la cimentación es necesario emplear “resortes”, para este caso se utilizaron elementos tipo Shell para representar las zapatas a las cuales se les incorporó la rigidez del suelo de cimentación mediante el uso del módulo de Winkler o coeficiente de Balasto [13], también a estos elementos se les restringió el desplazamiento horizontal. Las dimensiones de los plintos son de 2,30 m por 2,30 m con 0,50 m de altura en la cual se usó un $qa = 230 \text{ kPa}$ al cual le corresponde una rigidez $K = 46000 \text{ kN/m}^3$, definido mediante la herramienta área *springs* que modela la interacción entre el suelo y la estructura con resortes cuya rigidez depende de la rigidez de suelo. La figura 6 muestra la incorporación de las zapatas como elementos tipo área a los cuales se les ha agregado la condición de soporte del suelo mediante resortes también tipo área.

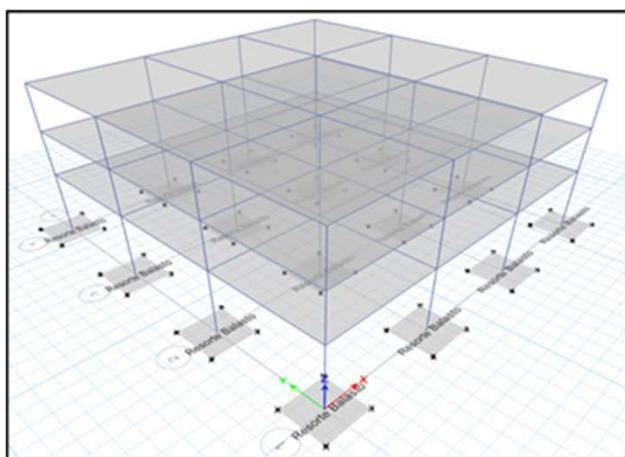


Figura 6: Modelo con resortes de área empleando el coeficiente de balasto.

3.5. Modelo con resortes puntuales empleando el coeficiente de reacción del suelo.

Para este modelo se empleó la propuesta de Bowles quien definió una ecuación para calcular el coeficiente de balasto en función a la capacidad admisible del suelo [14]. Se aplicaron las siguientes ecuaciones para hallar los coeficientes de rigidez correspondientes a la aproximación del coeficiente de balasto (ecuación 1), rigidez vertical (ecuación 2), rigidez rotacional alrededor del eje X (ecuación 3) y rigidez rotacional alrededor del eje Y (ecuación 4):

$$k_b = 40 * F_s * q_a \text{ dm} \quad (1)$$

$$k_v = k_b * A \quad (2)$$

$$k\theta_{xx} = k_b * I_{xx} \quad (3)$$

$$k\theta_{yy} = k_b * I_{yy} \quad (4)$$

En donde: k_b es la rigidez coeficiente de balasto, F_s es el factor de seguridad, q_a es la capacidad admisible del suelo, k_v es la rigidez vertical, A es el área de la zapata, $k\theta_{xx}$ es la rigidez rotacional alrededor de eje "X", $k\theta_{yy}$ es la rigidez rotacional alrededor de eje "Y", I_{xx} es la inercia alrededor de eje "X", I_{yy} la inercia alrededor de eje "Y". Se obtuvo una rigidez del coeficiente de balasto de $k_b = 27600 \text{ kN/m}^3$, y se calculó la rigidez vertical $k_v = 146000 \text{ kN/m}$ y una rigidez a la rotación alrededor del eje X de $k\theta_{xx} = 64360 \text{ kN} \cdot \text{m}$ y alrededor del eje Y de $k\theta_{yy} = 64360 \text{ kN} \cdot \text{m}$, la figura 7 muestra los resortes en las bases de las columnas.

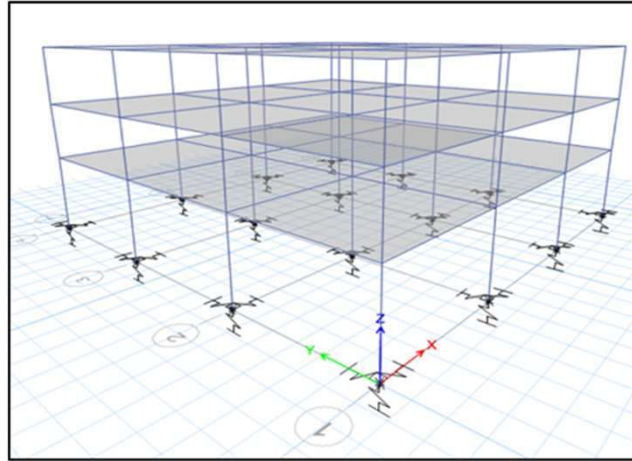


Figura 7: Modelo con resortes puntuales empleando el coeficiente de balasto.

3.6. Modelo con resortes puntuales aplicando los criterios del ASCE 7-16 y del FEMA 356

Este modelo es recomendado para evaluar la interacción suelo-estructura en los análisis lineales de acuerdo con lo indicado en el ASCE [15]. Este método incorpora la rigidez que aporta el suelo mediante una constante de resorte aplicada a cada uno de los seis grados de libertad de los apoyos [16]. Para determinar la rigidez a ser aplicada en cada uno de los grados de libertad se evalúan las propiedades dinámicas de la estructura asumiendo base fija para obtener el periodo de la estructura y la aceleración espectral que definen el módulo de corte del suelo en función del tipo de suelo y de la velocidad de onda de corte, V_s , la cual fue considerada igual a 180 m/s. Se muestran a continuación las ecuaciones usadas para determinar el módulo de corte efectivo del suelo, G_o (ecuación 5), el módulo de corte del suelo, G (ecuación 6), la rigidez traslacional en el eje X, K_x (ecuación 7), la rigidez traslacional en el eje Y, K_y (ecuación 8), la rigidez traslacional en el eje Z, K_z (ecuación 9), la rigidez rotacional alrededor del eje X, K_{xx} (ecuación 10), la rigidez rotacional alrededor del eje Y, K_{yy} (ecuación 11), y la rigidez rotacional alrededor del eje Z, K_{zz} (ecuación 12).

$$G_o = \frac{\gamma}{g} * V_s^2 \quad (5)$$

$$G = G_o * 0,5 \quad (6)$$

$$K_x = \frac{G B}{2 - \nu} \left[3,4 \left(\frac{L}{B} \right)^{0,65} + 1,12 \right] x \left\{ \left(1 + 0,21 \sqrt{\frac{D}{B}} \right) \cdot \left[1 + 1,6 \cdot \left(\frac{h d (B + L)}{B L^2} \right)^{0,4} \right] \right\} \quad (7)$$

$$K_y = \frac{G B}{2 - \nu} \left[3,4 \left(\frac{L}{B} \right)^{0,65} + 0,4 \left(\frac{L}{B} \right) + 0,8 \right] x \left\{ \left(1 + 0,21 \sqrt{\frac{D}{L}} \right) \cdot \left[1 + 1,6 \cdot \left(\frac{h d (B + L)}{L B^2} \right)^{0,4} \right] \right\} \quad (8)$$

$$K_z = \frac{G B}{1-\nu} \left[1,55 \left(\frac{L}{B} \right)^{0,75} + 0,8 \right] x \left\{ \left[1 + \frac{1}{21} \cdot \frac{D}{B} * \left(2 + 2,6 \frac{B}{L} \right) \right] \cdot \left[1 + 0,32 \left(\frac{d(B+L)}{B L} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \right\} \quad (9)$$

$$K_{xx} = \frac{G B^3}{1-\nu} \left[0,4 * \left(\frac{L}{B} \right) + 0,1 \right] x \left\{ 1 + 2,5 \frac{d}{B} \left[1 + \frac{2 d}{B} \left(\frac{d}{D} \right)^{-0,2} \sqrt{\frac{B}{L}} \right] \right\} \quad (10)$$

$$K_{yy} = \frac{G B^3}{1-\nu} \left[0,47 * \left(\frac{L}{B} \right)^{2,4} + 0,034 \right] x \left\{ 1 + 1,4 \left(\frac{d}{L} \right)^{0,6} \left[1,5 + 3,7 \left(\frac{d}{L} \right)^{1,9} \left(\frac{d}{D} \right)^{-0,6} \right] \right\} \quad (11)$$

$$K_{zz} = G B^3 \left[0,53 \left(\frac{L}{B} \right)^{2,4} + 0,51 \right] x \left\{ 1 + 2,6 \left(1 + \frac{B}{L} \right) \left(\frac{d}{B} \right)^{0,9} \right\} \quad (12)$$

Donde: γ es peso específico del suelo, g es la aceleración de la gravedad, V_s es la velocidad de onda de corte en el suelo, B es la longitud menor de la zapata, orientada en el sentido Y para el uso de las ecuaciones, L es la longitud mayor de la zapata, ν es el coeficiente de Poisson del suelo, D es la profundidad de desplante de la cimentación, h es la distancia entre el eje del espesor de la zapata hasta el nivel de superficie de suelo, d es el espesor de la zapata. Las ecuaciones anteriores deben ser usadas empleando el sistema inglés de unidades y en el caso en que $B = L$ se deben emplear las ecuaciones referidas al eje X tanto para el eje X como para el eje Y. En las ecuaciones 7, 8, 9, 10, 11 y 12, el primer término se refiere a la rigidez del grado de libertad a nivel superficial y el segundo término introduce una corrección por empotramiento debido a que la profundidad de la cimentación incrementa la rigidez de los grados de libertad de traslación y de rotación.

Aplicando las ecuaciones anteriores se obtuvieron los siguientes valores para las rigideces : $K_x = 439887 \text{ kN/m}$; $K_y = 439887 \text{ kN/m}$; $K_z = 30820 \text{ kN/m}$, $K_{xx} = 592124 \text{ kNm}$; $K_{yy} = 592124 \text{ kNm}$; $K_{zz} = 938115 \text{ kNm}$ los cuales se aplicaron a los seis grados de libertad en la base de las columnas del modelo matemático, ver figura 8.

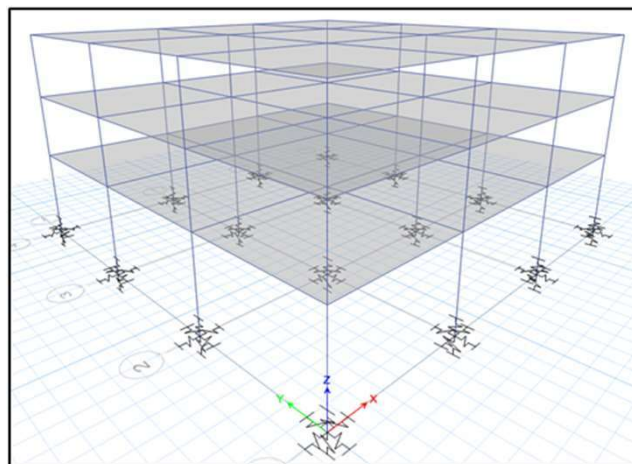


Figura 8: Modelo con resortes puntuales aplicando los criterios del ASCE 7-16 y del FEMA 356.

3.7 Modelo empleando la herramienta de ETABS para la interacción suelo-estructura según la NEHRP-2012.

El programa ETABS, a partir de su versión 2016, incorpora una herramienta llamada "Isolated column footing" (Define menu > Spring Properties > Isolated Column Footings) la cual junto con la herramienta "Soil profile" (Define menu > Spring Properties > Soil Profiles) sirve para considerar la interacción suelo-estructura a partir de los datos del suelo de cimentación y de la zapata considerada. La información necesaria a ingresar es la referente al subsuelo, en que se indican las diferentes capas de suelos, sus profundidades y las características de cada capa, y en cuanto a la cimentación se deben indicar las dimensiones de las zapatas (aisladas).

Para este modelo (figura 9) no es necesario tener restricción en los apoyos ya que el programa calcula las rigideces para cada uno de los grados de libertad de acuerdo con la recomendación de la *National Institute of Standards and Technology*, incluidos en el documento *Soil-Structure Interaction for Building Structures*. [17, 18]. Es fundamental realizar primero un análisis modal de la estructura incorporando empotramiento, ya que el periodo de la estructura con base empotrada es uno de los parámetros necesarios para emplear dicha herramienta y realizar el análisis.

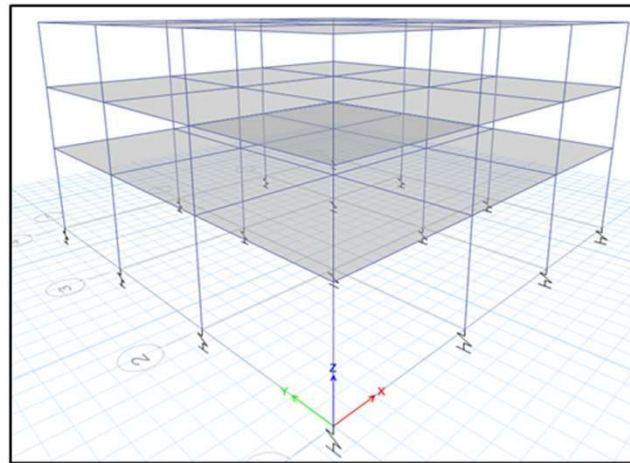


Figura 9: Modelo empleando la herramienta de ETABS para la interacción suelo-estructura según el NEHRP, 2012.

4. RESULTADOS

4.1. Propiedades dinámicas.

Para la estructura con empotramiento en la cimentación se muestra la tabla 1. El primer modo de vibración tiene un periodo $T = 0,653$ s, con una participación modal de 0,901 y se desplaza hacia el sentido Y, aunque se indica que el sentido es irrelevante en este caso debido a la regularidad de la estructura.

Tabla 1: Periodos y masas modales participantes de la estructura con empotramiento en la cimentación.

Modo	T	UX	UY	Sum UX	Sum UY	RZ	Sum RZ
1	0,653	0,004	0,901	0,004	0,901	0	0
2	0,653	0,901	0,004	0,905	0,901	0	0
3	0,53	0	0	0,905	0,905	0,906	0,906

La estructura con apoyos fijos presenta (ver tabla 2) un periodo $T = 1,096$ s en el primer modo, con una participación modal de 0,973 y se desplaza en sentido Y.

Tabla 2: Periodos y masas modales participantes de la estructura con apoyos fijos en la base.

Modo	T	UX	UY	Sum UX	Sum UY	RZ	Sum RZ
1	1,096	0,002	0,972	0,002	0,972	0	0,05
2	1,096	0,972	0,002	0,975	0,975	0	0,05
3	0,898	0	0	0,975	0,975	0,976	0,05

En la tabla 3 el primer modo de la estructura con vigas de amarre tiene un periodo de $T = 0,617$ s, con una participación modal de 0,829 y se desplaza hacia el sentido Y.

Tabla 3: Periodos y masas modales participantes de la estructura con empotramiento a nivel de cimentación y vigas de amarre.

Modo	T	UX	UY	Sum UX	Sum UY	RZ	Sum RZ
1	0,617	0,057	0,829	0,057	0,829	0	0
2	0,617	0,829	0,057	0,886	0,886	0	0
3	0,5	0	0	0,886	0,886	0,887	0,887

Tabla 4: Periodos y masas modales participantes de la estructura con empotramiento a nivel de contrapiso

Modo	T	UX	UY	Sum UX	Sum UY	RZ	Sum RZ
1	0,531	0,004	0,818	0,004	0,818	0	0
2	0,531	0,818	0,004	0,823	0,823	0	0
3	0,432	0	0	0,823	0,823	0,825	0,825

La tabla 5 corresponde a la estructura que emplea elementos tipo Shell como zapatas para añadirles el coeficiente de balasto y simular la rigidez del suelo tiene un periodo de $T = 0,722$ s, con una participación modal de 0,8348 y se desplaza en sentido Y.

Tabla 5: Periodos y masas modales participantes de la estructura con resortes de área con coeficiente de balasto.

Modo	T	UX	UY	Sum UX	Sum UY	RZ	Sum RZ
1	0,722	0,043	0,834	0,043	0,834	0	0
2	0,722	0,834	0,043	0,878	0,878	0	0
3	0,585	0	0	0,878	0,878	0,860	0,860

La estructura con resortes puntuales presenta el primer modo con un periodo de $T = 0,782$ s, con una participación modal de 0,9395 y se desplaza en sentido Y (ver tabla 6).

Tabla 6: Periodos y masas modales participantes de la estructura con resortes puntuales con coeficiente de balasto.

Modo	T	UX	UY	Sum UX	Sum UY	RZ	Sum RZ
1	0,782	0,002	0,939	0,002	0,939	0	0
2	0,782	0,939	0,002	0,941	0,941	0	0
3	0,636	0	0	0,941	0,941	0,945	0,945

La estructura con resortes representando la rigidez del suelo propuesto por el FEMA 356 presenta (ver tabla 7 el primer modo con un periodo de $T = 0,676$ s, con una participación modal de 0,892 y se desplaza en sentido Y.

Tabla 7: Periodos y masas modales participantes de la estructura con resortes puntuales según el ASCE/SEI 7-16 y FEMA 356.

Modo	T	UX	UY	Sum UX	Sum UY	RZ	Sum RZ
1	0,676	0	0,892	0	0,892	0	0
2	0,674	0,891	0	0,891	0,892	0	0
3	0,547	0	0	0,891	0,892	0,884	0,884

Los resultados de la tabla 8 presenta el primer modo con un periodo de $T = 0,616$ s, con una participación modal de 0,6188 y se desplaza en sentido X.

Tabla 8: Periodos y masas modales participantes de la estructura empleando la herramienta footing de ETABS.

Modo	T	UX	UY	Sum UX	Sum UY	RZ	Sum RZ
1	0,661	0,618	0,267	0,618	0,267	0	0
2	0,661	0,267	0,618	0,886	0,886	0	0
3	0,535	0	0	0,886	0,886	0,878	0,878

4.2. Esfuerzos de corte, momento de volcamiento y derivas de piso.

En esta sección se tomarán los resultados del análisis dinámico en la componente X para analizar y comparar los esfuerzos de corte, momentos de volcamiento por piso para las estructuras estudiadas debido a que en el análisis estático no presentan una variación considerable para ser tomada en cuenta. Como referencia se tomará la estructura modelada con empotramiento en la cimentación, modelo que tradicionalmente se lo emplea para análisis y diseño de estructuras de hormigón armado. Para la siguiente comparación se dividieron las estructuras analizadas en dos grupos, el primer grupo con las estructuras modeladas con empotramiento y apoyos fijo en la base y el segundo grupo con las estructuras modeladas con resortes en la base que incorporan la rigidez del suelo de cimentación.

A continuación, se muestra en las figuras 10 (a) y (b) el resumen de los cortantes por piso de dichas estructuras en la que se observa una similitud entre los modelos con empotramiento a nivel de cimentación con vigas de amarre, resortes tipo área con coeficiente de balasto, resortes puntuales con coeficiente de balasto y el modelo que emplea la herramienta *footing* basado en las rigideces del NIST GCR 12-917-21. Por otro lado, el modelo con apoyos fijos al ser un modelo que presenta restricción a la traslación y no a la rotación de los apoyos presenta una menor fuerza cortante en los pisos, en el primer piso se obtuvo una reducción de un 46%, el segundo piso con un 42% menos y el tercer piso con un 38%, todos estos valores son menores con respecto al modelo tradicional. También se destaca el modelo con resortes del FEMA 356 [18] al colocarle los valores calculados correspondientes a la rigidez del suelo para cada uno de los grados de libertad ya no se tendría un suelo infinitamente rígido respecto al modelo tradicional (base empotrada): Con esto el modelo presenta una disminución del 17% del esfuerzo de corte en el primer piso y un 14 % menos tanto segundo piso como en el tercer piso con respecto al modelo de base empotrada.

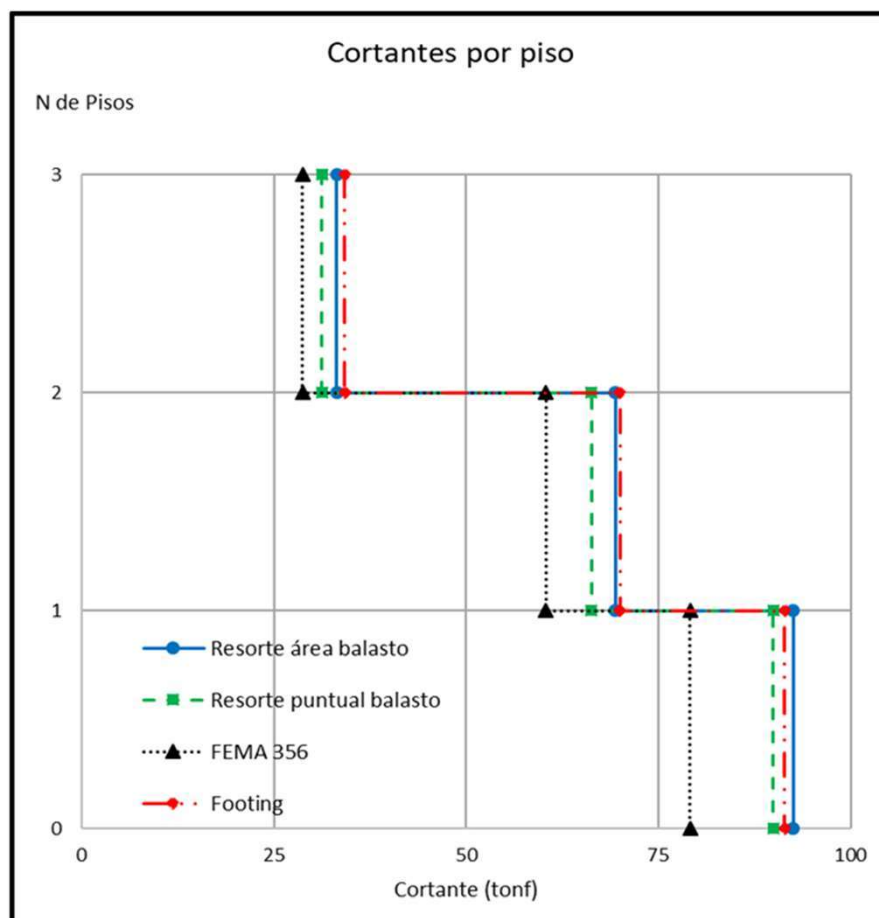
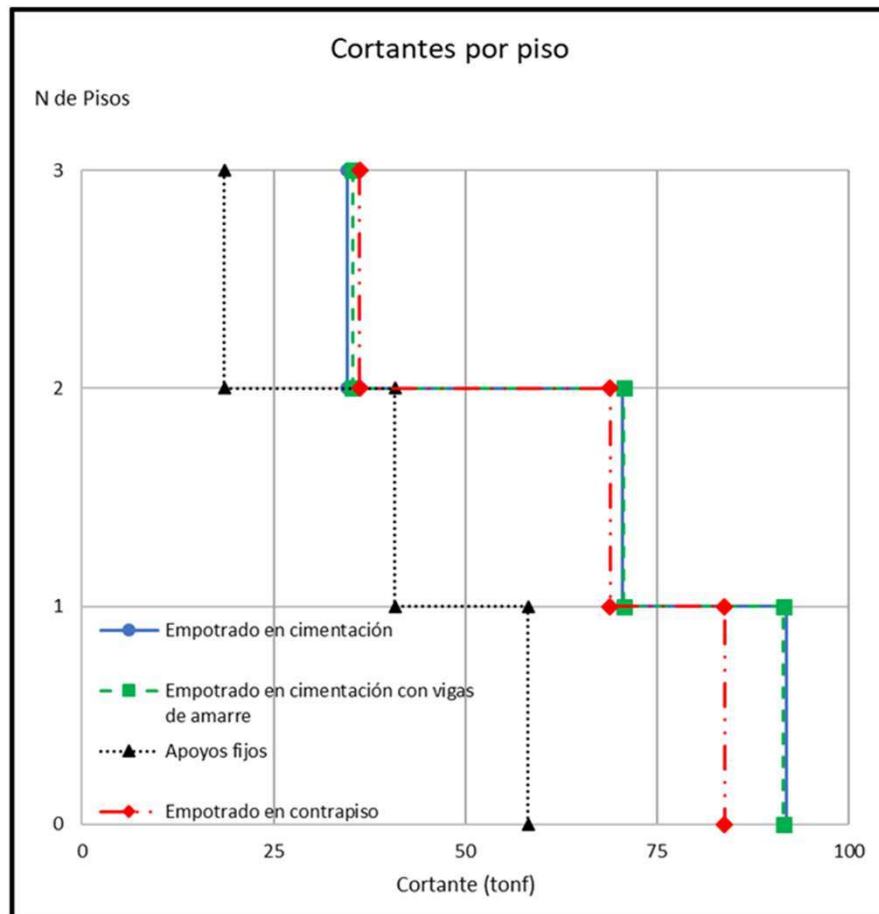


Figura 10: (a) Resumen de cortantes por piso de estructuras con apoyos fijos y empotramiento en la base. (b) Resumen de cortantes por piso de estructuras que incorporan resortes en la base.

En las figuras 11 (a) y (b) se puede observar el resumen de los momentos de volcamiento (fuerza de piso por la altura de piso) de las estructuras modeladas con empotramiento en la base a nivel de contrapiso se redujo el momento de volcamiento en la base en un 20% debido a que este modelo presenta una menor altura comparada a los demás, mientras que en la estructura con apoyos fijos en la base se obtuvo una reducción en el segundo piso de 46%, en la primera planta se obtuvo un 43% menos y 40% menos en la base. Por otro lado, en el segundo grupo el valor más notable es una reducción del momento de volcamiento en la base de un 14% correspondiente a el modelo con resortes del FEMA 356 [18].

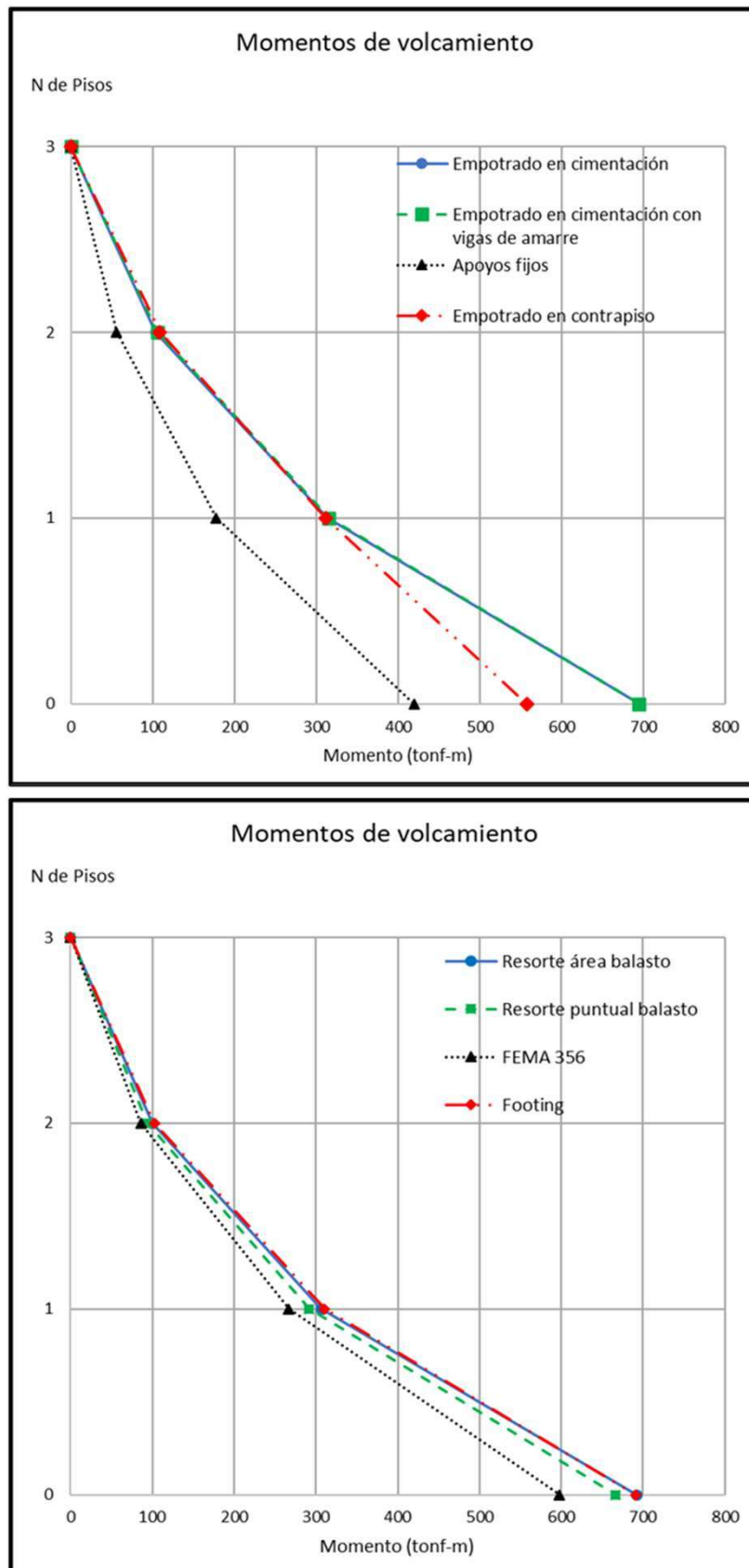


Figura 11: (a) Resumen de momentos volcantes de las estructuras con apoyos fijos y empotramiento en la base. (b) Resumen de momentos volcantes de las estructuras que incorporan resortes en la base.

Las figuras 12 (a) y (b) presenta el resumen de las derivas inelásticas de la cual se tomaron los resultados del análisis estático en sentido X, ya que estas eran más desfavorables con respecto al análisis dinámico. El caso de la estructura con apoyos fijos en la base las derivas de piso tanto en el primero como en el segundo piso sobrepasaron el límite establecido del 2%, también se observa la peculiaridad que en el primer piso el resultado de la deriva es mucho mayor con respecto al modelo empotrado a nivel de cimentación, este es el valor más alto que se obtuvo en los análisis. Otro caso a resaltar son las estructuras en que se aplicaron resortes de rigidez, puntuales o de área, calculados a partir del coeficiente de balasto y otros parámetros del suelo, lo que representa un aumento de las derivas de piso debido a que estos modelos son más flexibles respecto al modelo tradicional de base empotrada.

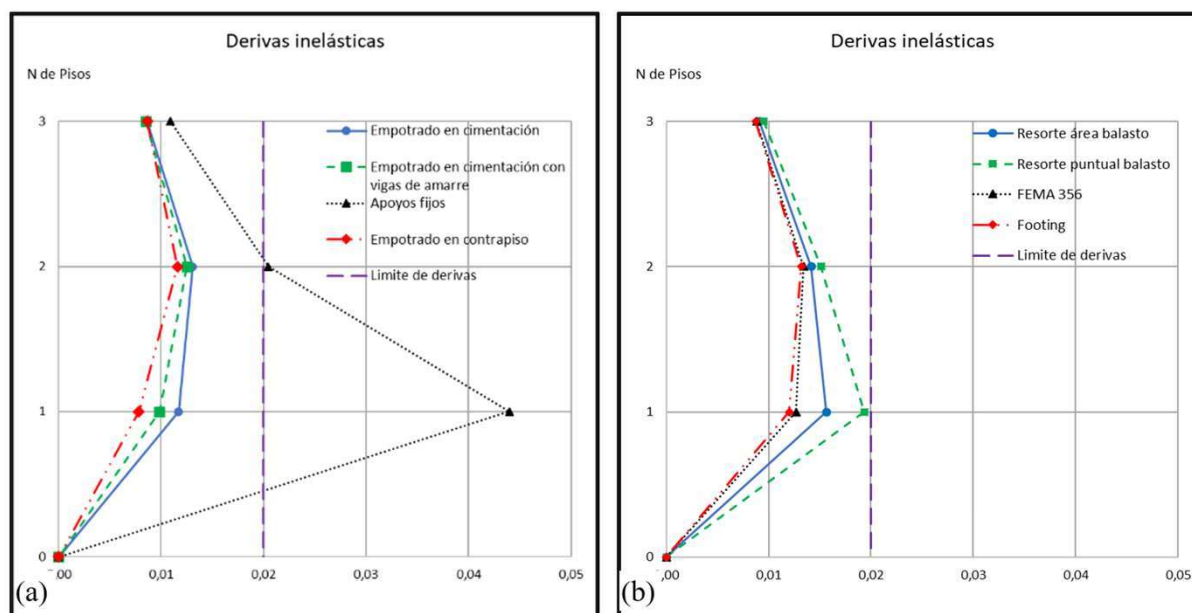


Figura 12: (a) Resumen de derivas inelásticas de estructuras con apoyos fijos y empotramiento en la base. (b) Resumen de derivas inelásticas de estructuras que incorporan resortes en la base.

5. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Se evaluaron los efectos de la modelación estructural de la cimentación en donde el comportamiento dinámico de las estructuras de hormigón armado con interacción suelo-estructura se traduce en un modelo estructural más flexible, sin embargo en ciertos casos realizar un análisis incorporando la interacción suelo-estructura puede generar resultados menores a los previamente obtenidos con el modelo empotrado, por ende se debe comparar y tomar en cuenta ambos resultados para realizar el diseño de una estructura debido a que en los periodos de la estructura y las derivas de piso se ven afectadas por la interacción suelo-estructura. En la actualidad es relativamente fácil incorporar interacción suelo-estructura en los modelos matemáticos.

Emplear el coeficiente de balasto para determinar la rigidez del suelo tiene influencia en las derivas de piso, en las cuales las estructuras que se modelaron con el coeficiente de balasto mediante resortes de área y resortes puntuales en la base resultan en valores mayores con respecto al empotrado. Dichas estructuras con resortes mencionadas anteriormente presentaron un incremento en las derivas del primer piso respectivamente con un 36% y 72% con respecto al modelo empotrado. Estos resultados se deben tener en cuenta al momento para evitar el efecto de golpeteo con edificaciones vecinas y evitar daños de elementos no estructurales considerables.

El uso de los modelos considerando empotramiento en la base se pueden suponer validos debido a que entrega valores mayores en cuanto a momentos flectores y cortantes de piso, por lo tanto, se puede asumir que realizar empotramiento en la base de la columna es un criterio válido al momento de realizar el diseño de los elementos que componen la estructura, traduciéndose esto a un diseño más seguro.

1. F. A. Llanos, L. G. Catacora, A. C. Galarza, and G. M. J. R. C. d. I. U. Mamani, "Influencia de la interacción suelo-estructura en el comportamiento de las viviendas aporticadas con zapatas aisladas en la ciudad de Juliaca," vol. 7, no. 2, pp. 70-81, 2020.
2. A. T. J. R. I. d. I. d. E. Colunga, "Interacción suelo-estructura. Reflexiones sobre su importancia en la respuesta dinámica de estructuras durante sismos," vol. 24, no. 2, pp. 141-165, 2019.
3. S. A. De la Cruz-Vega, S. J. Astocaza-Camargo, and E. A. J. R. C. d. I. Astocaza-Camargo, "Interacción suelo-estructura en la respuesta sísmica de una edificación para uso de oficinas con zapatas aisladas en suelo blando e intermedio de la región de Ica: e319," vol. 13, no. 1, 2022.
4. J. E. Chávez Castro, "Análisis de interacción suelo-estructura mediante un ensayo de pórtico a escala en una mesa vibratoria considerando un suelo típico de Quito," Quito, 2021., 2021.
5. J. P. Moehle, J. D. Hooper, and C. D. Lubke, *Seismic Design of Reinforced Concrete Special Moment Frames: A Guide for Practicing Engineers*. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of ..., 2008.
6. A. Domínguez, E. Martínez, and Q. Estrada, "Rigidez estructural variable en disipación de energía por fricción con elementos lámina," DINA, vol. 97, no. 4, pp. 347-347, 2022.
7. H. Marín, G. Benites, and D. Evangelista, "Influencia de la resistencia del suelo mejorado en el diseño de losa de cimentación mediante un modelo de interacción suelo-estructura," vol. 8, no. 2, pp. 135-148, 2021.
8. L. Pérez-Rocha and J. J. R. d. I. S. Avilés, "Evaluación de efectos de interacción en resistencias inelásticas," no. 69, pp. 45-71, 2003.
9. J. Avilés and L. E. P. J. R. d. I. S. Rocha, "Bases para las nuevas disposiciones reglamentarias sobre interacción dinámica suelo-estructura," no. 71, pp. 1-36, 2004.
10. NEC-SE-HM, Ministerio_de_Development_Urbano_y_Vivienda, Ed. Norma Ecuatoriana de la Construcción, primera ed. Quito-Ecuador, 2015.
11. Norma Ecuatoriana de la Construcción, MIDUVI, 2015.
12. Norma Ecuatoriana de la Construcción, MIDUVI, 2015.
13. N. J. B.-E. U. P. d. C. Morrison, "Interacción suelo-estructuras: semi-espaço de Winkler," 1993.
14. M. Guerra and D. J. Q. Chacón, Ecuador: Editorial Privada, "Manual para el diseño B. FEMA, "Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings," ed: Washington, DC, 2000.
15. FEMA-440, "Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures," vol. 7, no. 9, p. 11, 2005.
16. J. P. Stewart, G. L. Fenves, and R. B. Seed, "Seismic soil-structure interaction in buildings. I: Analytical aspects," J. Geotech. & Geoenviron. Engng., vol. 125, no. 1, pp. 26-37, 1999.
17. Seismic rehabilitation of existing buildings, E. American Society of Civil, 2007.