

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

<http://dx.doi.org/10.35381/i.p.v4i1.2162>

Análisis interacción suelo-estructura en una zona de riesgo con cimentación de pilotes, Cuenca, Ecuador

Soil-structure interaction analysis in a risk zone with pile foundations, Cuenca, Ecuador

Carlos Julio Cordero-Cabrera
carlos.cordero@ucacue.edu.ec
Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Azuay
Ecuador
<https://orcid.org/0000-0002-6373-6280>

Luis Mario Almache-Sánchez
lalmaches@ucacue.edu.ec
Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Azuay
Ecuador
<https://orcid.org/0000-0002-4711-5054>

Recibido: 15 de julio 2022
Revisado: 01 de septiembre 2022
Aprobado: 15 de octubre 2022
Publicado: 01 de noviembre 2022

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

RESUMEN

Las construcciones en zonas vulnerables en Cuenca vienen realizándose desde hace mucho tiempo. En el año 2018, la Dirección de Riesgos de la ciudad, identificó 60 sectores susceptibles a movimientos. Debido al comportamiento flexible de los suelos y a la potencia de estos estratos, surge la necesidad de investigar las características del subsuelo, centrando la presente investigación en la zona de riesgo de Paccha, ubicada al este de la ciudad. Mediante ensayos experimentales, y con la aplicación de simulaciones dinámicas, se analizó la estructura de una edificación propuesta. Así, se estudió una edificación con cimentación rígida, otra con interacción suelo-estructura y una tercera con pilotaje. Mediante los datos obtenidos en un análisis de nivel de desempeño ante un sismo raro, se puede observar que la consideración de pilotaje garantiza una seguridad estructural en las construcciones del área estudiada y por ende la tranquilidad de los ocupantes de estas.

Descriptores: Ingeniería civil; ingeniería de la construcción; industria de la construcción. (Tesauro UNESCO).

ABSTRACT

Buildings in vulnerable areas in Cuenca have been carried out for a long time. In 2018, the city's Risk directorate identified 60 sectors susceptible to movements. Due to the flexible behavior of the soils and the depth of these strata, the need arises to investigate the characteristics of the subsoil, focusing the present research on Paccha risk area, located to the east of the city. Through experimental tests, and with the application of dynamic simulations, the structure of a proposed building was analyzed. Thus, a building with a rigid foundation was studied, then considering soil-structure interaction and finally with piles. Based on the data obtained in an analysis of the level of performance in the event of a rare earthquake for the proposed cases, it can be observed that the consideration of piles, guarantees structural safety in the constructions of the studied area and therefore the tranquility of the occupants of the same.

Descriptors: Civil engineering; construction engineering; construction industry. (UNESCO Thesaurus).

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

INTRODUCCIÓN

Ubicado en una zona de subducción entre la placa tectónica de Nazca y la placa continental Sudamericana, Ecuador es un país con alto riesgo sísmico (Araujo et al., 2021), lo que hace que sus construcciones sean vulnerables ante este fenómeno. Pero este no es el único factor de riesgo existente para una edificación, existen otros como el de suelos expansivos, muy blandos, o con pendientes pronunciadas, que coadyuvan a que estos aumenten.

La construcción de edificaciones en zonas de riesgos son un tema de mucha importancia que no sólo se da a nivel local, sino en diversos lugares (Senthil & Muthukannan, 2021). Sin embargo, éstas no son las más adecuadas para construir edificios o viviendas. La falta de una cultura de autoprotección ha propiciado el desarrollo de la construcción de riesgo, lo que significa edificar en zonas de peligro, generando que los inmuebles y sus habitantes sean vulnerables. Así mismo la falta de estudios sobre las condiciones especiales del terreno a intervenir y los procedimientos adecuados de diseño y construcción permiten deficiencias que al final termina en daños en las edificaciones, ocasionando pérdidas económicas (Vivek & Hanumantha Rao, 2022) que no solo afectan al dueño de la vivienda sino también al conglomerado social. Estos gastos muchas veces deben ser asumidos por la ciudad que deben buscar alternativas en reubicaciones o mitigaciones de estos efectos.

Con base a la problemática presentada se justifica una investigación en la que se analice el tipo de suelo dentro de una zona de riesgo ubicada en el sector de Paccha al este de la ciudad de Cuenca (Figura 1), y se estudia una alternativa constructiva con sistema de pilotaje que son las cimentaciones preferidas para construcciones en suelos expansivos (Liu & Vanapalli, 2021), y así lograr una seguridad estructural en edificaciones de mediana altura. El conocimiento de cómo se está comportando el suelo en el sector que se estudia es de valiosa importancia no sólo para esta investigación sino para cualquier otro tipo de estudio que se quiera realizar, cómo puede ser buscar soluciones en problemas de vías, alcantarillas.

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

Los datos obtenidos del suelo permitieron realizar simulaciones de una estructura de mediana altura, con análisis de restricciones empotradas, otra tomando en cuenta la interacción suelo-estructura, y una propuesta con cimentación de pilotaje. Se trabaja con casos normales y con un análisis de desempeño sísmico usando el método de empuje incremental (pushover). Las comparaciones se realizan utilizando el programa Etabs (CSI Computers and Structures, Inc.).

Se hace una comparación derivada del análisis del comportamiento de la estructura aplicando un modelo espectral, lo que permite observar las propuestas estudiadas. Así como, el comportamiento de la demanda capacidad ante diferentes tipos de sismo de acuerdo a la normativa vigente.

MÉTODO

Cuenca, se encuentra localizada al Sur del país en la parte meridional de la Cordillera de los Andes. La topografía varía entre los 4.200 m.s.n.m. y los 1.000 m.s.n.m. La mayor concentración habitacional se localiza en las terrazas y aluviones de los ríos al norte y oeste de Cuenca (Hoja Geológica-Cuenca, 2009). Como universo se toma a un sector de una zona de riesgo situada en la parroquia de Paccha (Figura 1), situada en el área rural de la ciudad de Cuenca que son consideradas geológicamente inestables. El estudio se limita a una edificación de tres pisos con cimientos tipo zapatas y con pilotes:

Geología de la zona.

La propuesta tiene base en lo sugerido por la (NEC-SE-GC, 2015) en cuanto a cimentaciones se refiere. Se contempla información primaria con la realización de estudios de suelos en el sector delimitado, y para la parte de la geología local se utiliza como estadística base a la información a nivel macro del tipo de suelo existe en la zona (Figura 2). La misma que luego fue contrastada con los estudios específicos realizados.

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

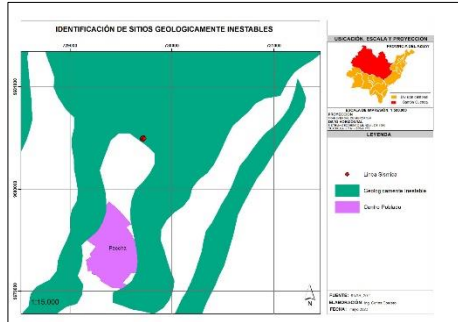


Figura 1. Localización de la zona de riesgo, Paccha.

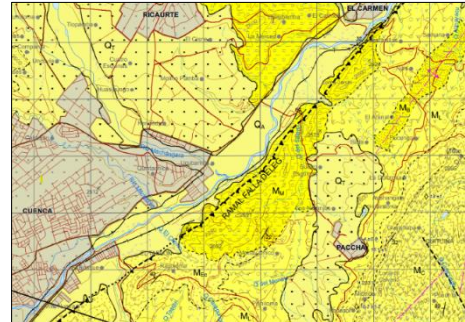


Figura 2. Geología del área [5]

Se realizó un recorrido de campo verificándose la georreferenciación de los contactos geológicos, la disposición de las características estructurales y unidades geológicas, procediéndose a su corroboración a través de la geofísica (Líneas Sísmicas de Refracción), ensayos de campo; reconociendo in situ de las características litológicas de las cuales se ha obtenido muestras para los respectivos ensayos en laboratorio. Se evidencia que la zona está constituida por dos unidades geológicas, Depósitos calificados como Coluviales (Dc) y Derrumbes (De) que están formados por materiales superficiales, materiales de la Formación Biblián (Mb) y la Formación Loyola (ML). Se tomó muestras de suelo con la realización de calicatas y ensayos de refracción sísmica que viene a complementar los datos.

Datos del sitio y velocidades de onda inferidas

En la zona se realizaron dos líneas sísmicas, una con respecto a otra perpendicular, con el objetivo de valorar los componentes del subsuelo en un terreno.

El programa de exploración geofísica de refracción, planteado para la presente investigación, consiste en la ejecución de ensayos de medición de la velocidad de propagación de las ondas “P” (V_p) y “S” (V_s) del terreno, denominados Refracción Sísmica, MASW. Las pruebas de refracción sísmica y MASW permiten determinar de indirectamente el espesor y compacidad de los estratos del suelo de cimentación, en el

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

área de estudio, hasta una profundidad máxima de 30 m a partir de pruebas en la superficie. La tabla 1 expone las coordenadas de las dos líneas sísmicas aplicadas sobre el terreno en estudio.

Tabla 1.

Coordenadas de las líneas sísmicas aplicadas sobre el terreno de estudio.

Ensayo	Coordenadas						Long. de
Sísmico	Inicio		Medio		Fin		exploración m
	X	Y	X	Y	X	Y	
LS – 1	729702	9680491	729709	9680499	729719	9680506	24
LS – 2	729712	9680480	729720	9680488	729729	9680496	24

Modelo de la estructura

Se propone un modelo tipo para el análisis (Figura 3), utilizando un pórtico con losas nervadas y con hormigón armado de resistencia a la compresión a los 28 días de 24 MPa para todos los elementos. Para las diversas simulaciones se trabajan utilizando el software ETABS de la compañía Computers and Structures, Inc. CSI.

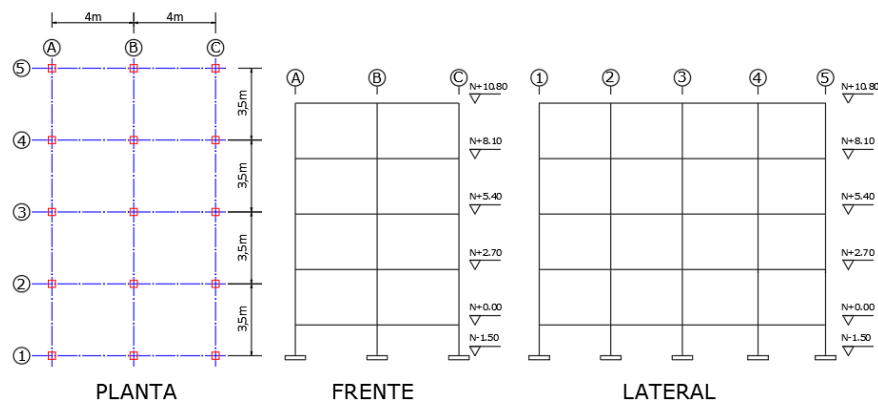


Figura 3. Modelo propuesto para análisis.

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

Normativa utilizada.

El análisis contempla el cumplimiento de la normativa vigente en el Ecuador, NEC-SE-CG, 2015 (NEC-SE-CG, 2015) y NEC-SE-DS (NEC-SE-DS, 2015).

- Cortante basal

El valor del cortante dinámico total en la base, obtenido por cualquier método de análisis dinámico, no debe ser menor del 80% del cortante basal V obtenido por el método estático (estructuras regulares) (NEC-SE-DS, 2015);

- Derivas de piso

La deriva máxima no debe excederse del 2 %;

- Periodos / Torsión

El primer y segundo modo de vibración deben ser traslacionales y el tercero torsional;

- Participación de masa

todos los modos que involucren la participación de una masa modal acumulada de al menos el 90% de la masa total de la estructura, en cada una de las direcciones horizontales principales consideradas (NEC-SE-DS, 2015).

Combinaciones de Carga.

Las combinaciones utilizadas están según lo propuesto por la (NEC-SE-CG, 2015), para el análisis de la estructura y para la cimentación.

$$U1 = 1.4D, \quad (1)$$

$$U2 = 1.2D + 1.6L, \quad (2)$$

$$U3 \text{ a } U10 = 1.2D + L \pm S, \quad (3)$$

$$U11 \text{ a } U18 = 0.29 \pm S, \quad (4)$$

$$CIM = D + L + S, \quad (5)$$

Donde: D: Carga muerta, L: Carga Viva, S: Carga de sismo estático y dinámico respectivamente.

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

Se considera una carga muerta de 3.256 kN/m² para los entrepisos y de 0.647 kN/m² para la terraza. La carga viva para vivienda es de 2 kN/m².

Cimentación

La cimentación es el material que media entre el terreno y los muros o entre el terreno y la estructura según la naturaleza del edificio a construir. Prácticamente se puede cimentar en cualquier sitio, siempre que se observen los procedimientos que han señalado las investigaciones para cada clase de terreno (Hidalgo Bahamontes, 2004). Es así que, el estudio y el cálculo de las cimentaciones de un edificio o cualquier obra precisan de un previo y adecuado conocimiento de la resistencia del terreno que faciliten datos geológicos e informaciones de conjunto (Bertin & Gasc, 1976). Los terremotos indican claramente la importancia de las propiedades locales de suelo sobre la respuesta sísmica de estructuras. Estos terremotos demostraron que el movimiento de las rocas puede amplificarse más de cinco veces en la base de la estructura.

Por lo tanto, existe una sólida base de ingeniería para determinar los movimientos sísmicos de campo libre para el análisis de la respuesta dinámica del sitio de muchas cimentaciones. Determinar el movimiento superficial de campo libre dependiente de la ubicación en la base de una estructura puede ser el paso más importante en el diseño resistente a terremotos de cualquier estructura (Wilson, 2000). Finalmente, en lo que respecta a las cimentaciones en suelos difíciles, hay que tomar en cuenta que no todos los problemas ocasionados por todos los suelos se pueden resolver, pero si se pueden tomar medidas preventivas para reducir la posibilidad de daño a estructuras construidas sobre ellas (Braja, 2011)

Los modelos para la comparación son de tres tipos: uno con cimentación normal con zapatas, que es el método constructivo más utilizado en la zona; otro con interacción suelo-estructura y un tercer modelo con el uso de pilotes.

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

Cimentación con zapatas aisladas.

Se trabaja con restricciones empotradas y para su cálculo se toma en cuenta la excentricidad producida por los momentos que llegan a ellas. Para estos casos la distribución de la presión nominal según (Braja, 2013) es:

$$q = \frac{Q}{BL} \pm \frac{6M}{B^2L} \quad (6)$$

Donde: Q: carga vertical total, M: momento sobre la cimentación, B, L: Ancho y largo de la cimentación.

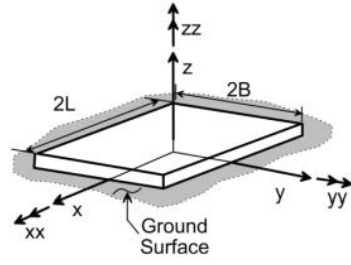
Cimentación considerando Interacción Suelo-Estructura

Un enfoque común de interacción suelo-estructura (SSI) está basado en la formulación de movimiento agregado (Clough & Penzien, 2015). Esta formulación es válida para movimientos de campo libre provocados por ondas sísmicas generadas por cualquier fuente (Wilson, 2010). Los fenómenos de interacción entre el suelo y la estructura (SSI) sometidos a cargas sísmicas han sido estudiados con pruebas de tabla de agitación sobre la interacción dinámica suelo-estructura sometida a cargas sísmicas, y los efectos SSI se analizan a través de un estudio comparativo entre el sistema de estructura del suelo y la condición de cimentación rígida. Los resultados muestran que los efectos SSI mitigan notablemente la respuesta dinámica de la estructura, y cuanto más cerca esté la frecuencia de la superestructura de la frecuencia del suelo, más obvio será el efecto de la interacción suelo-estructura (Liu et al., 2020). La Tabla 2, enumera las expresiones para la rigidez estática de la cimentación, K_j , para tres y tres grados de libertad de rotación para una zapata rectangular rígida ubicada en la superficie del suelo (Stewart et al., 2012).

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

Tabla 2.

Soluciones elásticas para la rigidez estática de zapatas rígidas en la superficie del suelo.

Grado de libertad	Pais and Kausel (Pais & Kausel, 1988)
Traslación a lo largo del eje z	$K_{z,sur} = \frac{GV}{1-\nu} \left[3.1 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.75} + 1.6 \right]$
Traslación a lo largo del eje y	$K_{y,sur} = \frac{GV}{2-\nu} \left[6.8 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 0.8 \left(\frac{L}{B} \right) + 1.6 \right]$
Traslación a lo largo del eje x	$K_{x,sur} = \frac{GV}{2-\nu} \left[6.8 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 2.4 \right]$
Torsión sobre el eje z	$K_{zz,sur} = GV^3 \left[4.25 \left(\frac{L}{B} \right)^{2.45} + 4.06 \right]$
Balanceo sobre el eje y	$K_{yy,sur} = \frac{GV^3}{1-\nu} \left[3.73 \left(\frac{L}{B} \right)^{2.4} + 0.27 \right]$
Balanceo sobre el eje x	$K_{xx,sur} = \frac{GV^3}{1-\nu} \left[3.2 \left(\frac{L}{B} \right) + 0.8 \right]$
G = módulo de corte (reducido para efectos de deformación grandes)	

El empotramiento de cimientos debajo de la superficie del suelo aumenta la rigidez estática a través de los factores η_j y K_j (Stewart et al., 2012) (Tabla 3).

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

Tabla 3.

Factores de corrección de empotramiento para la rigidez estática de zapatas rígidas.

Grados de libertad	Pais and Kausel (Pais & Kausel, 1988)
Traslación a lo largo del eje z	$\eta_z = \left[1 + \left(0.25 + \frac{0.25}{L/B} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^{0.8} \right]$
Traslación a lo largo del eje y	$\eta_y = \left[1 + \left(0.33 + \frac{1.34}{1 + L/B} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^{0.8} \right]$
Traslación a lo largo del eje x	$\eta_x \approx \eta_x$
Torsión sobre el eje z	$\eta_{zz} = \left[1 + \left(1.3 + \frac{1.32}{L/B} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^{0.9} \right]$
Balanceo sobre el eje y	$\eta_{yy} = \left[1 + \frac{D}{B} + \left(\frac{1.6}{0.35 + (L/B)^4} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^2 \right]$
Balanceo sobre el eje x	$\eta_{xx} = \left[1 + \frac{D}{B} + \left(\frac{1.6}{0.35 + (L/B)} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^2 \right]$

d_w = Altura de contacto efectivo de la pared lateral (puede ser menor que la altura total de la cimentación).

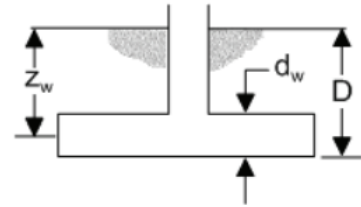
z_w = profundidad al centroide de contacto efectivo de la pared lateral.

A_w = Área de contacto sólida de pared lateral, para una altura de contacto efectiva constante, DW , a lo largo del perímetro.

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

Términos de acoplamiento:

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



Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

Las ecuaciones para modificadores de rigidez dinámica, α_j , y relaciones de amortiguamiento de radiación, β_j , para las zapatas rígidas ubicadas en la superficie del suelo se proporcionan en la Tabla 4 (Stewart et al., 2012).

Table 4.

Modificadores dinámicos de rigidez y relaciones de amortiguación de radiación para zapatas rígidas (Pais & Kausel, 1988).

Grado de libertad	Modificadores de rigidez superficial	Amortiguación de radiación
Traslación a lo largo del eje z	$\alpha_z = 1 - \left[0.4 + \left(\frac{0.2}{L/B} \right) a_0^2 \right]$	$\beta_z = \left[\frac{4\psi(L/B)}{K_{z,sur}/GB} \right] \left[\frac{a_0^2}{2\alpha_z} \right]$
Traslación a lo largo del eje y	$\alpha_y = 1$	$\beta_y = \left[\frac{4(L/B)}{K_{y,sur}/GB} \right] \left[\frac{a_0^2}{2\alpha_y} \right]$
Traslación a lo largo del eje x	$\alpha_x = 1$	$\beta_x = \left[\frac{4(L/B)}{K_{x,sur}/GB} \right] \left[\frac{a_0^2}{2\alpha_x} \right]$

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

lo largo del eje x		
Torsión sobre el eje z	$\alpha_{zz} = 1 - \left[\frac{\left(0.33 - 0.03\sqrt{\frac{L}{B} - 1}\right) a_0^2}{\left(\frac{0.8}{1 + 0.33\left(\frac{L}{B} - 1\right)}\right) + a_0^2} \right]$	$\beta_{zz} = \left[\frac{(4/3)[(L/B)^3 + L/B] a_0^2}{\left(\frac{K_{zz,sur}}{GB^3}\right) \left[\left(\frac{1.4}{1 + 3\left(\frac{L}{B} - 1\right)^{0.7}}\right) + a_0^2 \right]} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{zz}} \right]$
Balanc eo sobre el eje y	$\alpha_{yy} = 1 - \left[\frac{0.55 a_0^2}{\left(0.6 + \frac{1.4}{L/B^3}\right) + a_0^2} \right]$	$\beta_{yy} = \left[\frac{(4\psi/3)(L/B)^3 a_0^2}{\left(\frac{K_{yy,sur}}{GB^3}\right) \left[\left(\frac{1.8}{1 + 1.75\left(\frac{L}{B} - 1\right)}\right) + a_0^2 \right]} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{yy}} \right]$
Balanc eo sobre el eje x	$\alpha_{xx} = 1 - \left[\frac{\left(0.55 + 0.01\sqrt{\frac{L}{B} - 1}\right) a_0^2}{\left(2.4 - \frac{0.4}{\frac{L}{B^3}}\right) + a_0^2} \right]$	$\beta_{xx} = \left[\frac{(4\psi/3)(L/B) a_0^2}{\left(\frac{K_{xx,sur}}{GB^3}\right) \left[\left(2.2 - \frac{0.4}{\left(\frac{L}{B}\right)^3}\right) + a_0^2 \right]} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{xx}} \right]$
Orientar los ejes de tal manera que $L \geq B$.		
Amortiguación histórica del suelo, β_s , es aditivo a la amortiguación de la radiación de la base, β		
$a_0 = \frac{\omega B}{V_s}; \psi = \sqrt{2(1 - \nu)/(1 - 2\nu)}; \psi \leq 2.5$		

Modificadores de rigidez dinámica y relaciones de amortiguamiento por radiación de ondas para zapatas empotradas se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5.

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

Modificadores dinámicos de rigidez y relaciones de amortiguación de radiación para zapatas empotradas (Pais & Kausel, 1988).

Grado de Amortiguación de radiación libertad	
Traslación a lo largo del eje z	$\beta_z = \left[\frac{4[\psi(L/B) + (D/B)(1 + L/B)]}{K_{z,emb}/GB} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_z} \right]$
Traslación a lo largo del eje y	$\beta_y = \left[\frac{4[(L/B) + (D/B)(1 + \psi L/B)]}{K_{y,emb}/GB} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_y} \right]$
Traslación a lo largo del eje x	$\beta_x = \left[\frac{4[(L/B) + (D/B)(\psi + L/B)]}{K_{x,emb}/GB} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_x} \right]$
Torsión sobre el eje z	$\beta_{zz} = \left[\frac{\left(\frac{4}{3}\right) \left[3 \left(\frac{L}{B}\right) \left(\frac{D}{B}\right) + \psi \left(\frac{L}{B}\right)^3 \left(\frac{D}{B}\right) + 3 \left(\frac{L}{B}\right)^2 \left(\frac{D}{B}\right) + \psi \left(\frac{D}{B}\right) + \left(\frac{L}{B}\right)^3 + \frac{L}{B} \right] a_0^2}{\left(\frac{K_{zz,emb}}{GB^3}\right) \left[\left(\frac{1.4}{1 + 3(L/B - 1)^{0.7}}\right) + a_0^2 \right]} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{zz}} \right]$
Balanceo sobre el eje y	$\beta_{yy} = \left[\frac{\left(\frac{4}{3}\right) \left[\left(\frac{L}{B}\right)^3 \left(\frac{D}{B}\right) + \psi \left(\frac{D}{B}\right)^3 \left(\frac{L}{B}\right) + \left(\frac{D}{B}\right)^3 + 3 \left(\frac{D}{B}\right) \left(\frac{L}{B}\right)^2 + \psi \left(\frac{L}{B}\right)^3 \right] a_0^2}{\left(\frac{K_{yy,emb}}{GB^3}\right) \left[\left(\frac{1.8}{1 + 1.75L/B - 1}\right) + a_0^2 \right]} \right. \\ \left. + \frac{\left(\frac{4}{3}\right) \left(\frac{L}{B} + \psi\right) \left(\frac{D}{B}\right)^3}{\left(\frac{K_{yy,emb}}{GB^3}\right)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{yy}} \right]$

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

Balanceo sobre el eje x

$$\beta_{xx} = \left[\frac{\left(\frac{4}{3}\right) \left[\left(\frac{D}{B}\right) + \left(\frac{D}{B}\right)^3 + \psi \left(\frac{D}{B}\right) \left(\frac{D}{B}\right)^3 + 3 \left(\frac{D}{B}\right) \left(\frac{L}{B}\right) + \psi \left(\frac{L}{B}\right) \right] a_0^2}{\left(\frac{K_{xx,emb}}{GB^3}\right) \left[\left(\frac{1.8}{1 + 1.75L/B - 1}\right) + a_0^2 \right]} + \frac{\left(\frac{4}{3}\right) \left(\psi \frac{L}{B} + 1\right) \left(\frac{D}{B}\right)^3}{\left(\frac{K_{xx,emb}}{GB^3}\right)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{xx}} \right]$$

Amortiguación histórica del suelo, β_s , es aditivo a la amortiguación de la radiación de la base, β

$$\alpha_{emb} = \alpha_{sur}$$

$$a_0 = \frac{\omega B}{V_s}; \psi = \sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)}; \psi \leq 2.5$$

Pilotes y micropilotes

Los pilotes son piezas estructurales de acero, hormigón o madera que se utilizan para construir una cimentación profunda (Braja, 2011). Los pilotes de cimentación son necesarios en situaciones especiales, por ejemplo, cuando las capas superiores del suelo son muy comprimibles y demasiado débiles para soportar la carga de la superestructura, o cuando el suelo en el sitio de construcción puede expandirse y contraerse (Braja, 2013). Una definición para micropilotes que se puede encontrar es que son una variación de los pilotes en los que las dimensiones son menores y con la misma forma y funcionamiento (Martínez, 2015). La capacidad de carga última de un pilote de desplazamiento o preexcavado está definida por la siguiente expresión (NEC-SE-GC, 2015):

$$Q_{ult} = Q_s + Q_t = \sum f_{si} A_{si} + q_t A_t \quad (7)$$

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

Donde: Q_s : Capacidad o resistencia última por fuste, Q_p : Capacidad o resistencia última de punta, A_t : Área de la punta del pilote (sección transversal), A_s : Área del fuste del pilote i (perimetral), f_s : Es la resistencia unitaria de fuste i , q_t : Resistencia unitaria de punta.

Para el factor de seguridad se toma en cuenta la combinación de carga: Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño pseudo estático por lo que se trabaja con $FS=1.5$ (NEC-SE-GC, 2015).

Para suelo cohesivo, la fricción unitaria del eje a cualquier profundidad z a lo largo del pilote se calcula por el método β (Braja, 2013).

$$f = \beta \sigma'_0 \quad (8)$$

Donde: σ'_0 : esfuerzo vertical efectivo, β : tomado de (Geotechnical Society, 2006) para suelos cohesivos.

Para considerar pilotes cargados lateralmente que es el caso de estudio hay que tomar en cuenta que un pilote vertical resiste una carga lateral movilizandole la presión pasiva en el suelo que lo rodea. El grado de distribución de la reacción del suelo depende a) de la rigidez del pilote, b) de la rigidez del suelo y c) de la estabilidad de los extremos del pilote (Braja, 2012). La respuesta dinámica de una cimentación sobre pilotes depende de la rigidez dinámica y el amortiguamiento de los pilotes, para lo cual se toma en cuenta la formulación dada en 5.5.1 del informe sobre fundaciones para equipos dinámicos del ACI351.3R-18 (ACI Committee 351, 2018) y 4.2.5.2 del ACI351.3R-04 (ACI Committee 351, 2004).

Análisis Estático Lineal

Para la modelación y análisis se trabaja con el software Etabs, utilizando los datos previos de pre-dimensionamiento.

Análisis Estático No Lineal

El análisis estático no lineal pushover es utilizado para evaluar la respuesta sísmica de estructuras de edificios principalmente. La ventaja del análisis es que es eficiente para obtener la respuesta estructural a diferentes niveles de demanda. La aplicación de un patrón de carga estática distribuida a lo largo de la altura de la estructura, que aumenta hasta el mecanismo de colapso global de la estructura. Finalmente, la respuesta estructural se obtiene a partir de la curva de capacidad, que es una relación fuerza-desplazamiento generalmente reportada en términos de cortante base versus desplazamiento del techo (medido en un nodo de control) (Dong et al., 2022). Se utiliza el método propuesto por la ASCE 41-13 NSP (ASCE/SEI 41-13, 2014).

Niveles de desempeño

El nivel de rendimiento describe la condición límite de daño que puede considerarse satisfactoria para un edificio y un movimiento del suelo determinados. La condición limitante se describe por el daño físico dentro del edificio, la amenaza a la seguridad de la vida de los ocupantes del edificio creada por el daño y la capacidad de servicio posterior al terremoto del edificio (Applied Technology Council, 1996). La propuesta VISION 2000 define cuatro niveles de rendimiento que se muestran en la tabla 6 (Bendezu Romero et al., 2021) .

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

Tabla 6.

Control de daños y niveles de desempeño del edificio (American Society of Civil Engineers, 2000).

Daño general	Nivel de desempeño	Características principales
Muy ligero	Operacional Nivel (1-A)	Sin deriva permanente. Estructura sustancialmente conserva la fuerza original y rigidez. Menor agrietamiento de fachadas, tabiques y techos, así como elementos estructurales. Todos los sistemas importantes para la normalidad son funcionales
Ligero	Ocupación Inmediata Nivel (1-B)	Sin deriva permanente. Estructura sustancialmente conserva la fuerza original y rigidez. Menor agrietamiento de fachadas, tabiques y techos, así como elementos estructurales. Los ascensores pueden ser reiniciados. Protección operable al fuego.
Moderado	Seguridad de vida Nivel (3-C)	Alguna fuerza residual y la rigidez queda en todos los pisos. Funcionan elementos portadores de carga por gravedad. Ninguna falla fuera del plano de las paredes o volcado de parapetos. Cierta deriva permanente. Daños en tabiques. El edificio puede necesitar reparación económica.
Severo	Prevención de colapso Nivel (5-E)	Poca rigidez y resistencia residual, pero funcionan las columnas de carga y las paredes. Grandes derivas permanentes. Algunas salidas bloqueadas. Rellenos y parapetos no arriostrados fallan o incipiente falla. el edificio está cerca de colapsar

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

La investigación considera un nivel de amenaza sísmica para un tiempo de 50 años para un sismo raro o de diseño (10% de excedencia) (American Society of Civil Engineers, 2000). Los niveles de desempeño siguen lo propuesto por SEAOC VISION 2000, que toma en cuenta la capacidad de desplazamiento inelástico (Δ_p) (Bendezu Romero et al., 2021).

RESULTADOS

La tabla 7 muestra los materiales considerados y en la table 8 las secciones de los elementos estructurales.

Tabla 7. Materiales utilizados.

f'_c	23.54 MPa
f_y	411.88 MPa
E concrete	22800.46 MPa

Para la carga permanente de entepiso se utiliza 3.256 kN/ m² y para cubierta 0.647 kN/ m²; mientras que para carga viva 2 kN/ m² en el entepiso y 1 kN/ m² para cubierta.

Tabla 8.
Secciones de los elementos.

Columns	35x35 (cm)
Beams – axis A, B, C	25x30 (cm)
Beams – axis 1,2,3,4,5 level 0,+2.7,+8.1,+10.8	25x30 (cm)
Relieved slab	20 (cm)

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

Ensayos de suelos

Las figuras 4 y 5, exponen los resultados de las velocidades de onda compresional (V_p) y cortante (V_s) de las dos líneas sísmicas ejecutadas por el método MASW, en el sector de Paccha.

Para el caso de la LS – 1, expone en promedio velocidades de onda cortante V_s menores a 180 m/s, por lo cual, se lo catalogo como un Suelo Tipo E(NEC-SE-DS, 2015), perfiles de suelos rígidos que cumplen con el criterio de velocidades de onda cortante entre $V_s < 180$ m/s, suelos arcillosos con potencias mayores a los 3 m.

Para el caso de la LS – 2, expone velocidades de onda cortante que varían desde la superficie hasta los 30 m, entre 193 m/s y 206 m/s, correspondiente a un suelo tipo D (NEC-SE-DS, 2015), perfiles de suelos rígidos, que cumplen con el criterio de velocidad de onda cortante entre $360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$.

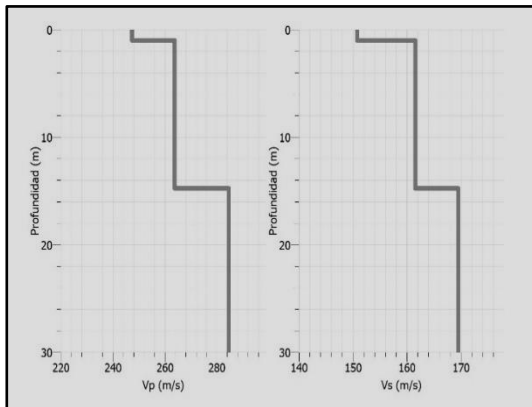


Figura 4. Velocidades de onda en la zona ensayo geofísico sísmico de refracción, LS – 1

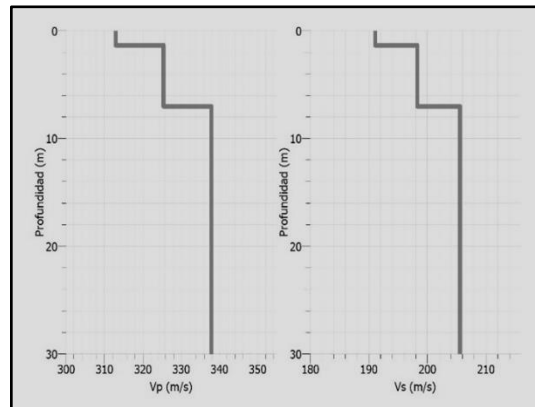


Figura 5. Velocidades de onda en la zona ensayo geofísico sísmico de refracción, LS – 2

Parámetros geomecánicos y elásticos

Los ensayos geofísicos de sísmica de refracción pueden determinar una serie de parámetros elásticos de los materiales del subsuelo. La tabla 9, expone los resultados del cálculo de varios parámetros en función de conocer las ondas compresionales y cortantes de las dos líneas ejecutadas.

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

Tabla 9.

Elastic parameters and vibration period determined as a function of wave velocities applying the MASW method.

Línea Sísmica	Estrato				Velocidad de onda		Peso específico	Capacidad del suelo	Relación de Poisson	Periodo
	Capa	Variación	Potencia	Vp	Vs	γ	qa	v	Ts	
		[m]	[m]	[m/s]	[m/s]	[KN/m³]	[KN/m²]		[s]	
LS – 1	1	0.00 – 30.00	30	274	166	13.02	54.03	0.21	0.72	
LS - 2	1	0.00 – 30.00	30	325	199	13.59	67.59	0.20	0.60	
Promedio									0.66	

Análisis estructural

Se realiza el análisis sísmico en el programa ETABS, 2019 considerando la normativa NEC-SE- DS15.

Cimentación base.

Una vez obtenido los resultados dados por el software, se modela las zapatas con el diseño tradicional según la ecuación 6, para la combinación desfavorable mediante la ecuación 5 y se considera la capacidad mínima según la tabla 9. Los resultados se muestran a continuación.

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

Tabla 10.
Resumen de cimentaciones (Base).

	L	H	num	Area [m2]
P1	2.65	20	4	28.1
P2	3.00	25	8	72.0
P3	3.45	30	3	35.7
Total				135.8

Cimentación considerando Interacción Suelo Estructura.

Con las ecuaciones de la tabla 2 se determina la rigidez estática de las zapatas a nivel de superficie, para posterior aplicar una corrección por desplante dada en la tabla 3. Finalmente se calcula los modificadores de rigidez dinámica y relaciones de amortiguamiento según la tabla 4 y 5 respectivamente. Los resultados se presentan a continuación.

Tabla 11.
Resumen de las funciones de impedancia calculadas, rigidez.

Rigidez	Unidad	Z1	Z2	Z3
Kz emb	kN/m	83082	90855	100742
Ky emb	kN/m	97631	105046	114414
Kx emb	kN/m	97631	105046	114414
Kzz	kN.m/rad	506417	675062	935677
Kyy	kN.m/rad	292718	370420	489005
Kxx	kN.m/rad	292718	370420	489005

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

Tabla 12.

Resumen de las funciones de impedancia calculadas, amortiguación.

Amortiguación	Unidad	Z1	Z2	Z3
Cz emb	kN.s/m	2111	2413	2823
Cy emb	kN.s m	2320	2593	2957
Cx emb	kN.s/m	2320	2593	2957
Czz	kN.s.m/rad	6611	8815	12223
Cyy	kN.s.m/rad	4410	5504	7155
Cxx	kN.s.m/rad	4410	5504	7155

Cimentación considerando Pilotes.

Para la cimentación con pilotes se toma en cuenta la capacidad por fuste y por punta según ecuación 7 y ecuación 8. Luego de lo cual se compara con la carga actuante y se establece el número necesario de pilotes para cada cimentación.

Tabla 13.

Resumen de pilotes calculados.

Reference	Muy								Cantidad
	Pu [kN]	Mux [kN-m]	[kN- m]	Qreq [kN]	Qu [kN]	d [m]	L [m]	S [m]	
P1	211.54	3.04	65.02	12.43	12.90	0.25	6	1.2	4
P2	331.28	0.00	68.65	16.42	16.7	0.30	6	1.4	8
P3	514.28	0.10	68.75	23.43	23.63	0.38	6	1.4	3

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

Con los datos de la tabla 9 y con lo expuesto en la formulación dada en 5.5.1 del informe sobre fundaciones para equipos dinámicos del ACI351.3R-18 (ACI Committee 351, 2018) y 4.2.5.2 del ACI351.3R-04 (ACI Committee 351, 2004), se obtienen las funciones de impedancia de los pilotes.

Table 14.
 Resumen de pilotes calculados, funciones de impedancia, rigidez.

Rigidez	Unidad	Z1	Z2	Z3
K _{ww}	kN/m	554341	756336	1157427
K _{xx}	kN/m	179026	212441	244931
K _{yy}	kN/m	179026	212441	244931
K _{zt}	kN.m/rad	702860	1199220	1762046
K _{ppx}	kN.m/rad	360548	620037	901227
K _{ppy}	kN.m/rad	360548	620037	901227

Table 15.
 Resumen de pilotes calculados, funciones de impedancia, amortiguación.

Amortiguación	Unidad	Z1	Z2	Z3
C _{ww}	kN.s/m	1724	2256	2896
C _{xx}	kN.s m	523	753	1208
C _{yy}	kN.s/m	523	753	1208
C _{zt}	kN.s.m/rad	675	1204	1638
C _{ppx}	kN.s.m/rad	1270	2272	2994
C _{ppy}	kN.s.m/rad	1270	2272	2994

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

Los periodos de vibración para el primer modo y las derivas en el sentido X y Y resultaron las siguientes:

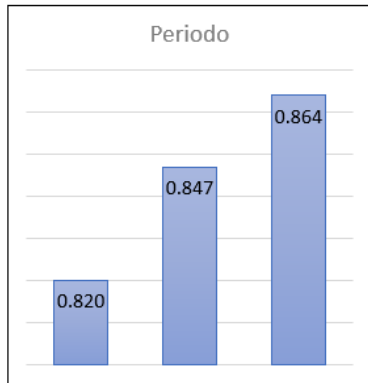


Figura 6. Periodos

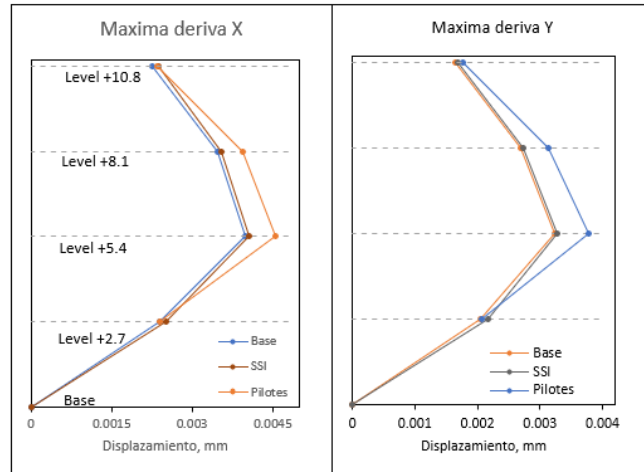


Figura 7. Derivas máximas

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

Establecidos los tres modelos se determina los niveles de desempeño con base a la tabla 6 y al método de la ASCE 41-13 NSP, obteniéndose los siguientes resultados para un sismo raro (sismo de diseño).

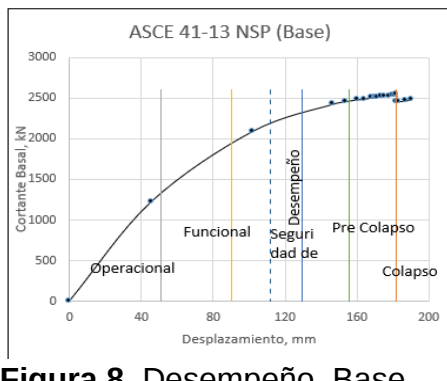


Figura 8. Desempeño, Base

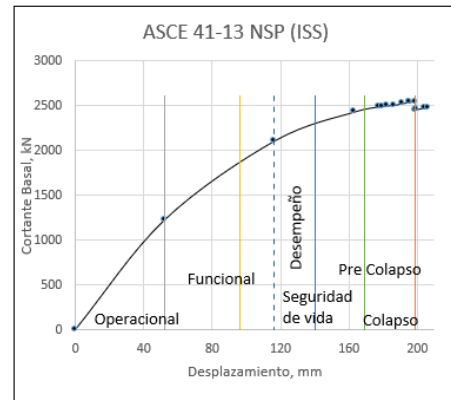


Figura 9. Desempeño, Interacción Suelo-Estructura

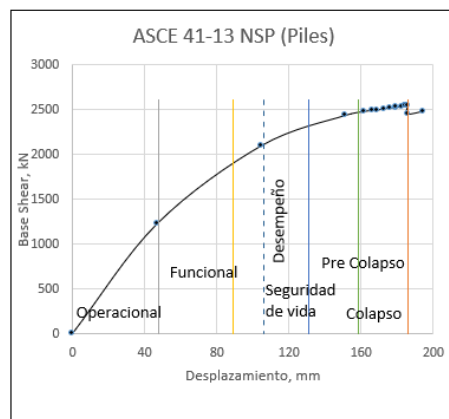


Figura 10. Desempeño, Pilotes

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

Tabla 16.
Resumen de Ductilidad.

	Base	ISS	Pilotes
Capacidad Ductilidad	3.59	3.80	3.89
Factor R	4.48	4.75	4.86
Ductilidad de demanda	2.20	2.22	2.22
Reserva de ductilidad	1.38	1.58	1.67

Adicionalmente se modelo una estructura de tres pisos, obteniéndose resultados de sus periodos de alrededor de 0.65 s para el modelo base, 0.67 para el modelo con interacción suelo estructura y 0,67 para el modelo con pilotes. Esto hizo que se descarte el resto de análisis por la proximidad a los periodos del suelo estudiado.

DISCUSIÓN

El suelo analizado tiene características tipo D y tipo E (Tabla 9), con un período dominante promedio de 0,66 s. Esto significa que los edificios de mediana altura pueden sufrir resonancia. El grosor del estrato (30m) con el mismo tipo de suelo según los levantamientos realizados (D o E), hacen que la solución con zapatas no sea la más recomendable.

El cálculo de la cimentación base con zapatas individuales reporta áreas muy grandes en el momento de la construcción, lo que representa el 121% (Tabla 10) del área de la planta baja. Esto nos hace inferir el uso de losas o pilotes de cimentación como una posible mejor solución.

El uso de la estructura de interacción del suelo muestra el aumento del período del suelo en un 3,3% y el uso de pilotes en un 5,4% (Figura 6). Las derivas, por otro lado, aumentan, teniendo en cuenta la interacción suelo-estructura en un 2%, y trabajando con pilotes en un 14% en la dirección x (Figura 7). Las derivas en la dirección y aumentan un 1,3% si

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

se tiene en cuenta la interacción suelo-estructura y un 16% cuando se utilizan pilotes (Figura 7).

El desempeño del edificio para un terremoto o diseño raro es aceptable en los tres casos; sin embargo, el factor R, con el que se modeló fue de 6, y todos los modelos presentaron una R más baja. La ductilidad de reserva es superior utilizando pilotes que con los otros modelos.

La rigidez dinámica y de amortiguación para cimentaciones con pilotes es bastante compleja y varía según los diferentes autores; sin embargo, se ha observado que, para obtener el nivel de demanda sísmica, estos no parecen ser significativos. Esto sugiere que los rangos de incidencia se pueden calcular en los valores introducidos para la rigidez y la amortiguación y observar su comportamiento.

CONCLUSIÓN

El uso de pilotes en la zona de riesgo analizada presenta un comportamiento aceptable en la parte de demanda sísmica, dejando una ductilidad de reserva mayor que los otros modelos.

El uso de zapatas no es una opción económicamente viable, ya que representa un área mayor que la del piso base.

Las viviendas de tres plantas de altura representarían un riesgo mayor, siendo sus periodos en torno al de suelo analizado (0,66 s). Dejándolos vulnerables porque pueden entrar en resonancia.

Teniendo en cuenta la interacción de la estructura del suelo en el análisis de las estructuras muestra claramente su comportamiento ante las diferentes cargas a las que están sometidas, mostrando de una manera más real su respuesta a las mismas.

FINANCIAMIENTO

Esta investigación no recibió ninguna subvención específica de agencias de financiación en los sectores público, comercial o sin fines de lucro.

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

AGRADECIMIENTO

Los autores desean agradecer a todo el grupo de personal de la Universidad Católica de Cuenca por su aporte en el programa de maestría de Ingeniería Civil con mención en estructuras sismorresistentes.

REFERENCIAS CONSULTADAS

- ACI Committee 351. (2004). Aci-3513R-04-foundations-for-dynamic-equipment. <https://acortar.link/aVS8aO>
- ACI Committee 351. (2018). ACI 351.3R-18 Report on Foundations for Dynamic Equipment. <http://concrete.org/Publications/>
- American Society of Civil Engineers. (2000). FEMA 356 prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. <https://acortar.link/FvJnwD>
- Applied Technology Council. (1996). ATC-40 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Volume 1. <https://www.atcouncil.org/pdfs/atc40toc.pdf>
- Araujo, S., Valette, B., Potin, B., & Ruiz, M. (2021). A preliminary seismic travel time tomography beneath Ecuador from data of the national network. Journal of South American Earth Sciences, 111, 103486. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2021.103486>
- ASCE/SEI 41-13. (2014). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784412855>
- Bendezu Romero, M., Miguel, L., Bendezú, G., & Claudio, J. (2021). Seismic Performance and Damage State of Reinforced Concrete Frame Buildings Using Fragility Curves in Lima 2021. Retrieved from <https://n9.cl/twun4>
- Bertin, R., & Gasc, C. (1976). Cimentaciones y obras en recalces [Foundations and underpinning works]. (2da ed.). Editores Técnicos asociados.
- Braja, D. (2013). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica [Fundamentals of Geotechnical Engineering]. Recuperado de <https://acortar.link/d7XapV>

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

- Braja, D. (2011). Fundamentos ingeniería cimentaciones [Fundamentals of foundation engineering]. Recuperado de <https://acortar.link/OlCwxz>
- Clough, R. W., & Penzien, J. (2015). Dynamics of structures. <http://parastesh.usc.ac.ir/files/1538888752479.pdf>
- Dong, W., Mata-Lemus, R., Idrees-Rustom, A., Sánchez-Rodríguez, J., Torres-Moreno, R., Nuñez-Castellanos, E., & Bustamante-Laissle, G. (2022). Assessment of Strength Reduction Factor on Concrete Moment Frames According to the New Venezuelan Seismic Code. <https://doi.org/10.3390/buildings12030255>
- Geotechnical Society. (2006). Canadian Foundation Engineering Manual (4th ed.). Canadian Geotechnical Society.
- Hidalgo Bahamontes, A. (2004). Construcción de cimientos [Foundation construction]. (Ed. actual). CEAC.
- Hoja Geológica-Cuenca, H. (2009). Hoja Geológica, Cuenca, 2009 (p. 1).
- Liu, S., Li, P., Zhang, W., & Lu, Z. (2020). Experimental study and numerical simulation on dynamic soil-structure interaction under earthquake excitations. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 138, 106333. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106333>
- Liu, Y., & Vanapalli, S. K. (2021). Mechanical behavior of a floating model pile in unsaturated expansive soil associated with water infiltration: Laboratory investigations and numerical simulations. Soils and Foundations, 61(4), 929-943. <https://doi.org/10.1016/J.SANDE.2021.06.004>
- Martínez, Á. (2015). Bioconstrucción: como crear espacios saludables, ecológicos y armoniosos [Bioconstruction: how to create healthy, ecological and harmonious spaces]. Ediciones I. [Recuperado de https://n9.cl/f7h0d](https://n9.cl/f7h0d)
- NEC-SE-CG. (2015). Norma Ecuatoriana de la Construcción, Cargas (No Sísmicas) [Ecuadorian Construction Standard, Loads (Non-Seismic)]. Recuperado de https://cicp-ec.com/documentos/NEC_2015/NEC_SE_CG_Cargas_Sismicas.pdf

Carlos Julio Cordero-Cabrera; Luis Mario Almache-Sánchez

- NEC-SE-DS. (2015). Norma Ecuatoriana de la Construcción, Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente [Ecuadorian Construction Standard, Seismic Hazard Seismic Resistant Design]. Recuperado de <https://acortar.link/HvgMXt>
- NEC-SE-GC. (2015). Norma Ecuatoriana de la Construcción, Geotecnia y Cimentaciones [Ecuadorian Construction, Geotechnics and Foundations Standard]. Recuperado de <https://online.portoviejo.gob.ec/docs/nec6.pdf>
- Pais, A., & Kausel, E. (1988). Approximate formulas for dynamic stiffnesses of rigid foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 7(4), 213-227. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(88\)80005-8](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(88)80005-8)
- Senthil, J., & Muthukannan, M. (2021). Predication of construction risk management in modified historical simulation statistical methods. *Ecological Informatics*, 66, 101439. <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2021.101439>
- Stewart, J., Crouse, C. B., Hutchinson, T., Lizundia, B., Naeim, F., & Ostadan, F. (2012). Soil-Structure Interaction for Building Structures. Grant/Contract Reports (NISTGCR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=915495
- Vivek, A., & Hanumantha Rao, C. H. (2022). Identification and analysing of risk factors affecting cost of construction projects. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.12.228>
- Wilson, E. L. (2000). Three dimensional static and dynamic analysis of structures: a physical approach with emphasis on earthquake engineering (3rd ed.). *Computers and Structures*. <https://acortar.link/dKcmbV>