

Artículo Original

Influencia de la interacción suelo-estructura en el comportamiento de las viviendas aporricadas con zapatas aisladas en la ciudad de Juliaca
Influence of soil-structure interaction on the behaviour of houses framed with isolated footings in the city of Juliaca

**Araca Llanos, F. H¹; Gómez Catacora, L¹; Cahui Galarza, A¹;
Marín Mamani, G.²**

¹Universidad Peruana Unión; Facultad de Ingeniería y Arquitectura sede Juliaca. Perú

²Universidad Nacional del Altiplano; Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura. Perú

RESUMEN

La respuesta estructural ante un sismo de un edificio de concreto armado se ve afectado por la interacción de tres componentes: el suelo, la cimentación y la estructura. El propósito del presente es determinar la influencia de la interacción suelo-estructura en el comportamiento de las viviendas a porricadas en la ciudad de Juliaca, Perú. El método incorporo la flexibilidad del suelo según las recomendaciones de la FEMA 356/440 además de verificar el desempeño y las respuestas sísmicas entre los modelos con base empotrada y base flexible en los diferentes puntos de estudio, para los edificios con planta cuadrada de 2 y 3 pisos. Los principales resultados muestran que la influencia de la interacción suelo-estructura no es significativa, sin embargo, en los edificios de 4 y 5 pisos el efecto es muy significativo. Los edificios con planta rectangular de 2 pisos al asignar la flexibilidad en la base de fundación no son significativos, en cambio en los edificios de 3, 4 y 5 pisos presentan mayor efecto de la interacción suelo-estructura. En términos de fuerzas cortantes y los momentos de volteo el incremento de la interacción suelo-estructura no supera el 1%, por lo tanto, no modifica la resistencia del edificio.

Palabras clave: Base empotrada, ensayo SPT, interacción suelo-estructura y respuesta sísmica.

ABSTRACT

The structural response to an earthquake of a reinforced concrete building is affected by the interaction of three components: the ground, the foundation and the structure. The purpose of the present is to determine the influence of the soil-structure interaction on the behavior of framed houses in the city of Juliaca, Peru. The method incorporated soil flexibility according to FEMA 356/440 recommendations in addition to verifying the performance and seismic responses among the models with embedded base and flexible base in the different study points, for the 2 and 3 story square buildings. The main results show that the influence of the soil-structure interaction is not significant, however, in the 4- and 5-storey buildings the effect is very significant. Buildings with rectangular plan of 2 floors when assigning flexibility in the foundation base

***Autor Correspondiente: Grover Marín.** Universidad Nacional del Altiplano; Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura. Perú

Correo electrónico: grover_marin@hotmail.com

Fecha de recepción: marzo 2020 Fecha de aceptación: abril 2020



are not significant, however in the 3, 4 and 5 floors buildings present greater effect of the soil-structure interaction. In terms of shear forces and tilting moments, the increase of the soil-structure interaction does not exceed 1%, therefore, it does not modify the strength of the building.

Keywords: Embedded base, seismic response, soil-structure interaction and SPT test.

INTRODUCCIÓN

El Perú forma parte del cinturón del fuego del pacífico donde se desarrolla el 80% de los sismos alrededor del mundo, este alto índice de sismicidad se debe a la colisión entre la Placa Nazca y la Placa Sudamericana que sufre un proceso de subducción (Tavera, 2014). El mapa sísmico del Perú indica que la peligrosidad sísmica es alta y se observa mayor actividad sísmica en las zonas 3 y 4, perteneciendo a esta zona la ciudad de Juliaca (Bernal y Tavera, 2002). Las construcciones en las zonas sísmicas se incrementan a diario en nuestro país debido a la expansión urbana y crecimiento de la población (Villareal, 2009; López, Coronel, y Rojas, 2014). En la región Puno, la ciudad de Juliaca es el principal foco de atracción poblacional y en los últimos años ha experimentado un crecimiento territorial acelerado en equipamiento e infraestructura, las cuales no fueron construidas con asistencia técnica, como también obvian el estudio geológico del suelo que es un valor de gran interés en la ingeniería.

La respuesta de una estructura ante un evento sísmico es afectada por la interacción de tres componentes: el suelo, la cimentación y la propia estructura, el análisis tradicional supone la superficie de apoyo de la estructura como base rígida, mientras la interacción suelos - estructura es un modelo teórico-experimental que estudia el comportamiento real de la estructura ante cargas cíclicas (Moreno, 2014). El efecto de la interacción suelo-estructura (ISE) en un edificio de 6 pisos para uso de departamento con diferentes cimientos; zapatas aisladas, zapatas corridas y losa de cimentación, concluyo que, el edificio analizado con zapatas aisladas tiene mayor efecto en la ISE ante los demás (Angamarca, 2008). En Saucedo (2016) también se analiza un edificio de categoría B aplicando la ISE en diferentes tipos de suelos; suelo rígido, suelo intermedio y suelo blando, concluyendo que los suelos blandos muestran mejor respuesta del efecto ISE que el resto.

El movimiento de la superficie del terreno durante un sismo es un dato de gran interés a la hora de proyectar estructuras en edificaciones (Soriano, 1989; Perepérez, 2014). La dinámica del suelo estudia el comportamiento real y la respuesta de masas del suelo durante la aplicación rápida de cargas (Alva, 2002; Auersch, Romero, y Galvín, 2014). Este comportamiento puede ser: pérdida de resistencia del suelo, cambios de volumen en el suelo, cambios en el estado de esfuerzo de las masas del suelo, amplificación dinámica y resonancia en los suelos (Quinde y Reinoso, 2016). Las propiedades y el comportamiento del suelo se pueden anticipar a través de los ensayos dinámicos, una de las propiedades importantes de la dinámica del suelo es el módulo de elasticidad (Theurer et al., 2017).

Según Leoni (2013) la relación de la norma N60 para suelos arcillosos (ecuación 1) con el factor de seguridad de nivel 2 es un criterio de análisis del comportamiento del suelo, otra de las propiedades es el módulo de Poisson (ν), FEMA 440 (2005) que recomienda un valor para suelos arcillosos $\nu = 0.45$, y el módulo dinámico de corte al suelo (G) es una de las propiedades más importantes en la dinámica del suelo, ya que es el parámetro directo y

representativo en el cálculo de esfuerzo y deformación que este experimenta, y según la teoría de la elasticidad el módulo de corte G se relaciona con el módulo de elasticidad y el módulo de Poisson (ecuación 2)

$$E_s = 48(N_{60})^{0.64} \left[1 - \left(\frac{1}{F_s} \right)^{(0.15+0.004N_{60})} \right] \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$G = \frac{E_s}{2(1+\nu)} \quad \text{Ecuación (2)}$$

La interacción suelo - estructura (ISE) es el análisis más completo para determinar el comportamiento real de la estructura ante la aplicación de cargas dinámicas. Para un mejor entendimiento sobre la aplicación de ISE. Según De Wit et al. (2014) las ondas sísmicas en la superficie del terreno generan movimientos a las estructuras desplantadas sobre él, entonces, el desplazamiento del terreno en el campo libre (\ddot{u}) es diferente que el desplazamiento de la cimentación de la estructura (u') significa que existe la ISE y si en caso estos dos desplazamientos fueran iguales entonces no existe la ISE. El propósito fue determinar el grado de influencia de la ISE en los edificios para uso de vivienda unifamiliar de 2, 3, 4 y 5 pisos con configuración geométrica en planta (planta cuadrada y planta rectangular), estas se analizaron en cuatro puntos aleatorios en la ciudad de Juliaca.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se identificó cuatro puntos de muestreo en la ciudad de Juliaca: Jr. Manuel Prado con el Jr. Mariano Pandia, Parque de la pileta Rinconada, Jr. Luis Bancharo con Jr. Manuel Pardo y Jr. Sucre con Jr. San salvador, en donde se determinó las propiedades mecánicas y las propiedades dinámicas mediante correlaciones. En cada punto de estudio se analizó cada modelo estructural de planta cuadrada y rectangular, para obtener la respuesta sísmica de la estructura debido a la influencia de la interacción suelo-estructura. Para estimar el grado de influencia de la interacción suelo-estructura se optó por el modelo FEMA 356 (2000) la cual considera la flexibilidad de la base de fundación en el modelo estructural. Las estructuras a analizar son viviendas unifamiliares con sistema estructural a porticado cimentadas con zapatas aisladas y configuración geométrica en planta cuadrada y rectangular (Figura 1), las mismas con variación de pisos de 2, 3, 4 y 5. Los modelos estructurales expuestos representan las características típicas de las construcciones de viviendas unifamiliares en la ciudad de Juliaca.

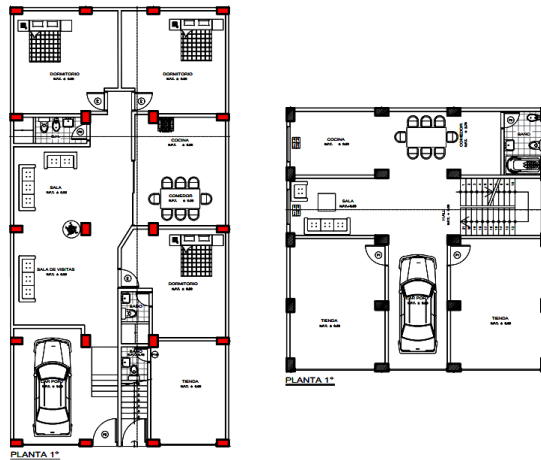


Figura 1: Geometría típica de modelos estructurales estudiados

La obtención de la muestra de esta investigación es no probabilística y de conveniencia, el tipo de investigación es descriptivo y comparativo, debido a que, se realizó una comparación de las respuestas sísmicas de estructuras con base rígida y modelos estructurales con interacción suelo-estructura analizadas en los diferentes puntos de estudio, el diseño de investigación es cuasi experimental, debido a que se tiene el control de dos variables independientes (número de pisos y geometría en planta) y la variable dependiente es la respuesta sísmica del modelo de base rígida y base flexible, y las variables independientes; suelo de apoyo, número de pisos, geometría en planta y con ISE y sin ISE.

La ISE es el contacto dinámico entre suelo cimentación estructura, que consiste en hacer participar al suelo en el análisis estructural debido a que el suelo absorbe una parte de la energía liberada por los sismos (Cutimbo, 2016). Según FEMA 440 (2005) el comportamiento de los modelos estructurales apoyados en fundaciones rígidas, el movimiento de campo libre es el movimiento teórico de un solo punto en la superficie del terreno (Khoshnoudian, Ahmadi y Azad, 2014), suponiendo que no existe estructuras cercanas a él (figura 2a), mientras que la (Figura 2b) incorpora la flexibilidad a la fundación dentro del modelo estructural, incluyen para la estimación de la flexibilidad y esfuerzos de la cimentación mediante la idealización de resortes, las diferencias entre estos se muestra en la (Tabla 1). Este enfoque es válido para el modelo estructural como para los componentes geotécnicos del cimiento. Estas mejoras en el modelo resultan importantes para los resultados con base rígida y una exacta representación de la respuesta natural de la estructura.

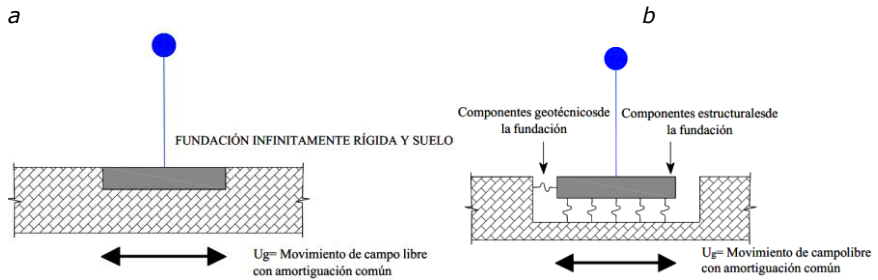


Figura 2: Comportamiento de modelos estructurales (a) modelo de base rígido, (b) modelo de base flexible.

Tabla 1: Diferencia entre las edificaciones con base empotrada y base flexible

Base indeformable	Base deformable
- No existe alteración del movimiento en los diferentes puntos del terreno.	- Existe alteración del movimiento en diferentes puntos del terreno (efecto de sitio).
- No existe desplazamiento relativo de la influencia respecto al terreno.	- Presenta alteración del movimiento de campo libre, debido a la presencia de la cimentación (interacción cinemática).
- No existen componentes de movimiento de cuerpo rígido de la superestructura (cabeceo y traslación).	- Existe un desplazamiento relativo de la fundación respecto al terreno producido por las masas de la superestructura (interacción inercial)

Fernández (2013) Propone las diferencias entre base empotrada y base flexible

RESULTADOS

a. Capacidad Admisible de suelos

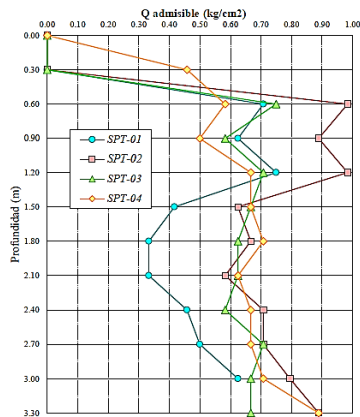


Figura 3: Capacidad admisible según la profundidad, en los puntos de estudio.

La Figura 3 muestra, los resultados de la capacidad admisible de los suelos que se obtuvieron mediante la relación del número de golpes N_{60} para suelos arcillosos, fórmula propuesta por TERZAGHI. En la misma figura se puede visualizar que la menor capacidad admisible se encuentra en el suelo SPT-01 y en los suelos SPT-02, SPT-03, SPT-04 presentaron una mejor capacidad resistente del suelo.

En la Tabla 2 se muestra el resumen de los resultados del ensayo de SPT, la clasificación del suelo se realizó mediante SUCS encontrando suelos de arcillas inorgánicas de baja plasticidad y arcillas inorgánicas de alta plasticidad. Las viviendas con planta cuadrada y rectangular de 2, 3, 4 y 5 pisos se cimentarán a una profundidad de 1.50 m, 1.80 m, 2.10 m y 2.40 metros respectivamente.

Tabla 2: Capacidad admisible a profundidad de diseño.

SPT	Clasificación (SUCS)	Capacidad Admisible (kg/cm^2)			
		$h = 2.40$ m	$h = 2.10$ m	$h = 1.80$ m	$h = 1.50$ m
SPT - 01	CH	0.500	0.458	0.333	0.333
SPT - 02	CL	0.708	0.708	0.583	0.667
SPT - 03	CL	0.708	0.583	0.625	0.625
SPT - 04	CL	0.667	0.667	0.625	0.708

b. Respuesta sísmica Estructural

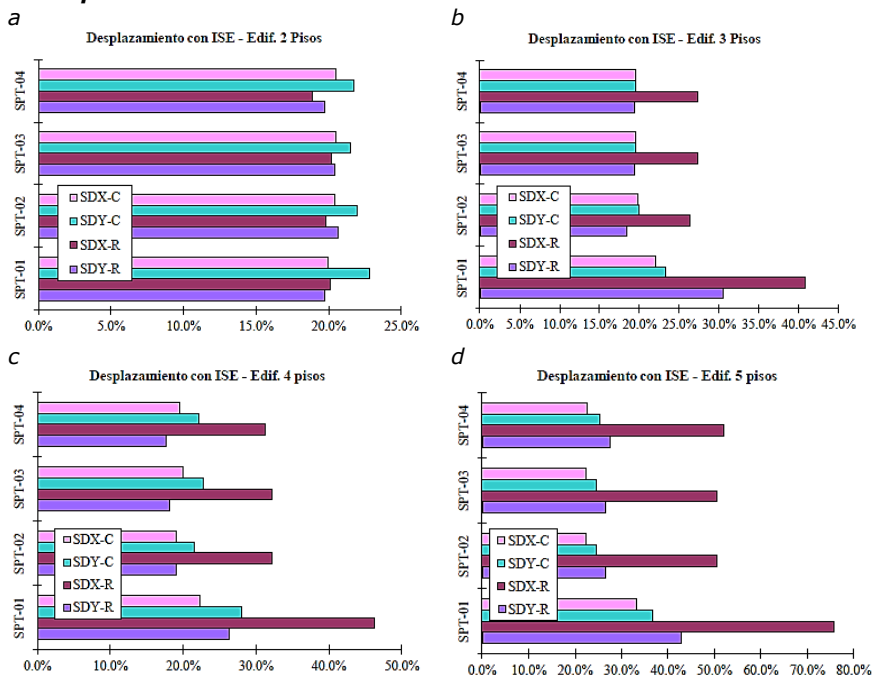


Figura 4: Incremento de desplazamientos con ISE

Al realizar todos los modelos estructurales con base empotrada y base flexible se tiene los siguientes resultados (Figura 4) de la respuesta sísmica como: desplazamientos, periodos naturales, distorsiones de entrepiso, fuerzas cortantes mínimas y momento de volteo.

Al evidenciar los fenómenos de la interacción suelo-estructura en los modelos estructurales analizados, existe un incremento significativo de los desplazamientos laterales tal como se muestra en la figura 4c y 4d. Los edificios de 2 pisos sufren un incremento no superior al 23.0%, en los edificios de 3 pisos existe un aumento no mayor del 41.0%, los edificios de 4 pisos experimentan un incremento de desplazamientos no superior al 46.50% y finalmente los edificios de 5 pisos experimentan mayor incremento debido a la flexibilidad de la base de fundación no mayores al 75.72%, por lo tanto, a medida que los niveles de las estructuras aumentan, el efecto de la interacción suelo-estructura se evidencia más, así mismo, los incrementos máximos registrados debido al base flexible son evidentes en las edificaciones con planta rectangular en los cuatro puntos de estudio de la ciudad de Juliaca.

Al aplicar la flexibilidad de la base en los modelos estructurales, se tiene el incremento de los valores de periodos naturales en los cuatro puntos de estudio como se ilustra en la (Figura 5).

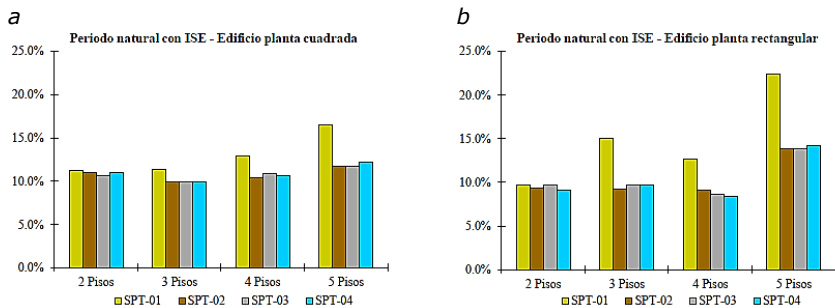


Figura 5: Incremento del periodo natural con ISE

La Figura 5 muestra que los primeros periodos de vibración se desarrollaron en la dirección "Y" para ambos edificios (planta cuadrada-rectangular). La norma nos indica que la participación de masas debe ser mayor al 90% por lo menos en los tres primeros modos de vibración, lo cual los resultados obtenidos superaron dicha especificación. Además, se muestra que los edificios con planta cuadrada de 2, 3, 4 y 5 pisos el incremento máximo del periodo natural en el suelo SPT-01 (cerro clorado parte baja) de 11.27%, 11.37%, 12.89% y 16.47% respectivamente. Observándose también que al aplicar la ISE en los edificios con planta rectangular de 2, 3, 4 y 5 pisos donde el incremento máximo del periodo se encuentra en el suelo SPT-01 (cerro clorado parte baja) de 9.69%, 15.05%, 12.70% y 22.38% respectivamente.

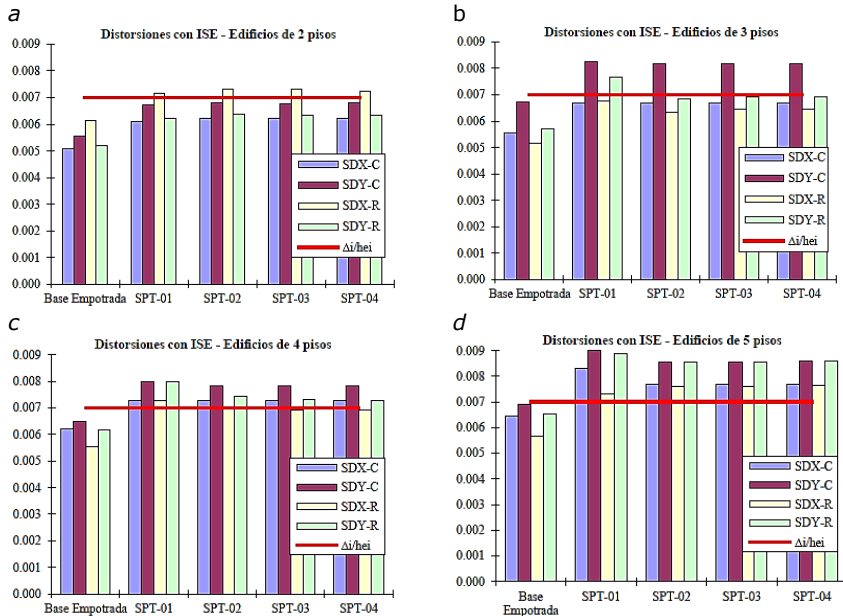


Figura 6: Incremento de distorsión con ISE

Al presentarse los fenómenos de la interacción suelo – estructura en los modelos estructurales analizados, existe un incremento de las distorsiones en ambas direcciones (Figura 6c y 6d). En edificios de planta cuadrada y planta rectangular de 2 pisos, el incremento es mínimo no supera el 23.0%, en edificios de 3 pisos los incrementos son inferiores a 35.0% superando la deriva límite en algunas direcciones de los modelos estructurales, en edificios de 4 pisos el incremento de la distorsión no excede el 32.0% llegando a superar la deriva límite en ambas direcciones y en edificios de 5 pisos el aumento de la distorsión es considerable no mayor de 36.0%, sin embargo en todas sus direcciones exceden la deriva límite de la NTP E030-2018, cabe indicar que, la mayor modificación de la distorsión debido a la flexibilidad de la base de fundación se evidencia más en los edificios de planta rectangular.

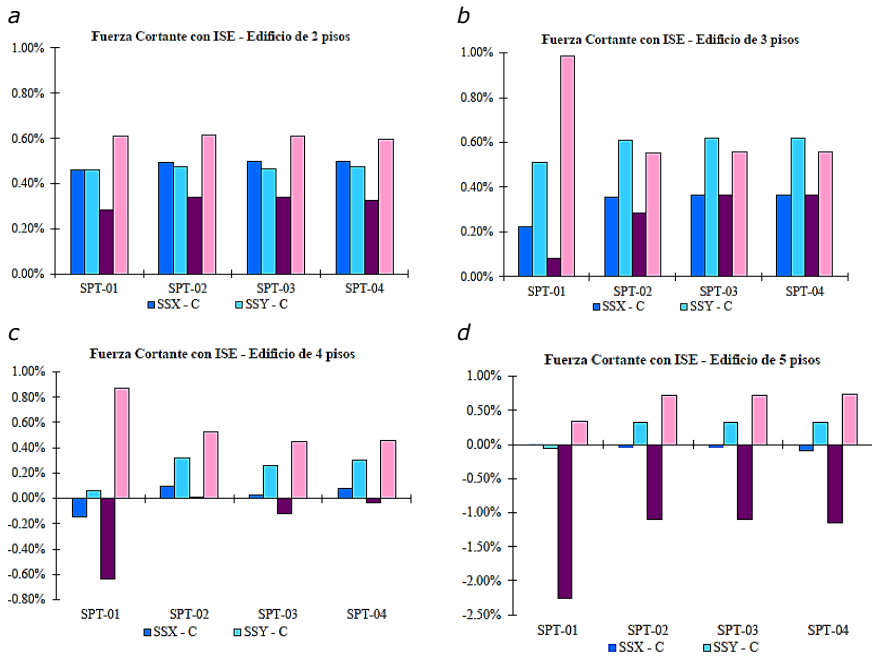


Figura 7: Incremento de la fuerza cortante con ISE

Las fuerzas cortantes máximas se producen en el primer piso en todos los modelos analizados, así mismo los valores de las cortantes dinámicas son mayores al 80% de las cortantes estáticas. En la (Figura 7c y 7d) se pueden observar que al aplicar la ISE en los modelos empotrados el incremento no supera más del 1%, por lo tanto, no influye significativamente en las fuerzas cortantes, así también en los edificios de 4 y 5 pisos los valores hasta disminuyen, esto indica que la estructura es suficientemente rígida lateralmente y la resistencia del edificio no se modifica.

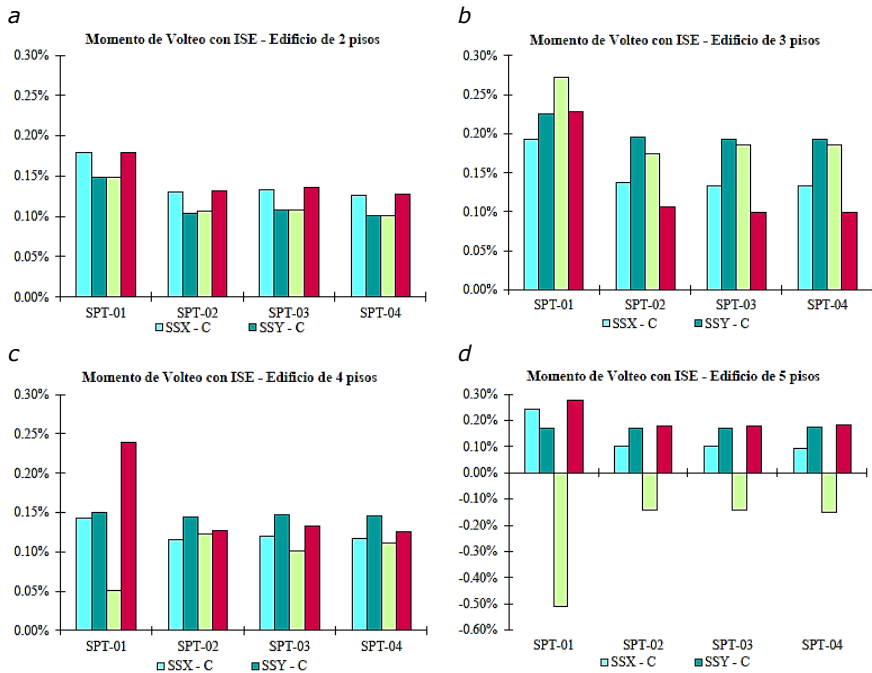


Figura 8: Incremento de momento de volteo con ISE

El 31.25% de casos analizados se observa un incremento menor de 20% en el desplazamiento máximo, mientras que en el 68.75% de casos analizados se observa un incremento en el desplazamiento superior al 20% al presentarse el fenómeno de la interacción suelo-estructura, por lo tanto, los casos evaluados presentan mayor modificación de desplazamiento. El 40.60% de casos analizados se observa un incremento menor de 10% en el periodo de vibración máxima, mientras que en el 59.40% de casos analizados se observa un incremento en el periodo de vibración superior al 10% al presentarse el fenómeno de la interacción suelo-estructura, por lo tanto, los casos evaluados presentan mayor modificación de los periodos de vibración. El 20.31% de casos analizados se observa un incremento menor del 20% en las distorsiones, mientras que en el 79.69% de casos analizados se observa un incremento en las distorsiones mayor al 20% al presentarse el fenómeno de la interacción suelo-estructura, por lo tanto, los casos evaluados presentan mayor modificación de las distorsiones.

CONCLUSIONES

Según los ensayos realizados en los cuatro puntos de estudio de la ciudad de Juliaca, se determinó que la menor capacidad portante del suelo se ubica en la parte baja de cerro colorado. Los valores registrados son (SPT-01) desde 0.333 kg/cm² hasta 0.500 kg/cm², por otro lado, en los tres puntos (SPT-02, SPT-03,

SPT-04) varía desde 0.583 kg/cm² hasta 0.708 kg/cm². Las fuerzas cortantes máximas se desarrollaron en el primer piso en todos los modelos analizados. Se cumple con la exigencia de la norma sobre las fuerzas cortantes mínimas, donde los valores de las cortantes dinámicas son mayores al 80% de las cortantes estáticas. Las fuerzas cortantes no superan el 1% al aplicar la ISE en los modelos tradicionales, esto indica que, las estructuras son suficientemente rígida y no modifican las resistencias iniciales de los edificios.

El aumento de los momentos de volteo en los 32 modelos analizados incluyendo la rigidez del suelo que no es significativo debido a que no superan el 1%. Se cumple con la exigencia del factor de seguridad mayor al 1.2, donde los edificios analizados soportaran los sismos horizontales en ambas direcciones sin que ocurra volteo o torsión. las estructuras analizadas en los cuatro puntos de estudio se tienen el mayor efecto de la interacción suelo-estructura en el suelo 1 (parte baja del cerro colorado), y en los demás puntos el comportamiento es casi semejante. También se concluye que los edificios con planta cuadrada a partir de los 4 pisos existen mayor influencia, y en los edificios con planta rectangular a partir de 3 pisos, esto dependerá del área de fundación de las estructuras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alva, J. (2002). *Dinámica de Suelos* (1st ed.). Lima - Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Auersch, L., Romero, A., y Galvín, P. (2014). Respuesta dinámica de edificaciones producida por campos de ondas incidentes considerando la interacción suelo-estructura. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(4), 256-263.
- Bernal, I., y Tavera, H. (2002). Geodinámica, sismicidad y energía sísmica en Perú.
- Cutimbo, W. (2016). *Ingeniería sísmo resistente* (1st ed.). Moquegua - Perú: Universidad José Carlos Mariátegui.
- De Wit, S. J., Alonso, P., Schwaren, L., Mataix-Cols, D., Lochner, C., Menchón, J. M., y Hoexter, M. Q. (2014). Multicenter voxel-based morphometry mega-analysis of structural brain scans in obsessive-compulsive disorder. *American journal of psychiatry*, 171(3), 340-349.
- FEMA 356. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. ASCE (1st ed.). Washington, D.C.: FEMA 356.
- FEMA 440. (2005). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. nehrp (1st ed.). Washington, D.C.: FEMA 440.
- Fernández, L. (2013). *Influencia de la interacción dinámica suelo estructura en la respuesta dinámica de las estructuras*. Construcción y Tecnología En Concreto, 1, 20-23.
- Khoshnoudian, F., Ahmadi, E., y Azad, A. I. (2014). Damping coefficients for soil-structure systems and evaluation of FEMA 440 subjected to pulse-like near-fault earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 61, 124-134.
- Leoni, A. (2013). *Parametrización de suelos*. Universidad Nacional de la Plata (1st ed.). Ecuador: Universidad Nacional de la Plata. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.02.002>
- López, O. A., Coronel, G., y Rojas, R. (2014). Índices de priorización para la gestión del riesgo sísmico en edificaciones existente. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 29(4), 107-126.
- Moreno Silva, J. M. (2014). Sistema de cimentación en placa-pilotes. análisis de interacción suelo-estructura, para un edificio de 12 pisos y sótano en la ciudad de Bogotá.
- Perepérez, B. (2014). La peligrosidad sísmica y el factor de riesgo. *Informes de la Construcción*, 66(534), 018.
- Quinde Martínez, P., y Reinoso Angulo, E. (2016). Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la Ciudad de Cuenca. *Ingeniería sísmica*, (94), 1-26.

- Saucedo, L. (2016). *Efectos de interacción suelo estructura en suelos muy rígido, intermedio y blando en el comportamiento estructural del edificio Clínica Los Fresnos, Cajamarca*. Universidad Privada del Norte.
- Soriano, A. (1989). *Interacción suelo-estructura*. Modificación del movimiento. Física de La Tierra, 0(1), 287.
- Tavera, H. (2014). Evaluación del peligro asociado a los sismos y efectos secundarios en Perú.
- Theurer, M. M., Jiménez, J. V., Baquerizo, E. S., Gonzales, E., Zambrano, I. B., Cevallos, G. V., y Lucio, S. (2017). Parámetros para la construcción de un modelo matemático para simular el comportamiento dinámico del suelo debajo de la universidad de Guayaquil-Ecuador. *Ingeniería*, 21(1), 31-40.
- Villareal, G. (2009). *Interacción Sísmica Suelo-Estructura En Edificaciones Con Zapatas Aisladas*. II Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Sísmica y Puentes (1st ed.). Lima - Perú.