

Influencia de la altura en la respuesta estructural de una edificación considerando la interacción suelo-estructura

Zenayda Corratgé Yzaguirre

zenayda@tesla.cujae.edu.cu

Jackelyne del Pilar Phala Quispe

Willian Cobelo Cristiá

Janet Otmara Martínez Cid

jcid@civil.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE)

Resumen: Se analizó la influencia de la altura en la respuesta estructural de tres edificaciones de tipología mixta con 15, 20 y 30 niveles ante la carga de sismo, teniendo en cuenta la interacción suelo-estructura. Para el cálculo de la carga sísmica se empleó el Método Estático Equivalente de la NC-46: 2017. La modelación se realizó con el software ETABS 16.1 y se analizaron dos variantes, una con la base empotrada, y la otra considerando la interacción suelo estructura mediante el modelo de Winkler con suelo E según clasifica la NC 46:2017. Se reportaron los valores de periodos de oscilación, los desplazamientos, las derivas, así como las solicitaciones de momentos flectores y fuerzas axiales en columnas y tímpanos para todas las variantes de estudio y se realizó la comparación entre ellos. Se concluye que la altura tiene influencia significativa cuando se analizan edificaciones cimentadas sobre suelo blando, atendiendo a la modificación que sufre la relación entre los periodos de vibración de la estructura y el suelo.

Palabras clave: Interacción suelo-estructura; edificios altos; carga de sismo; losa de cimentación.

Influence of height on the structural response of a building considering the soil-structure interaction

Abstract: The influence of height on the structural response of three buildings of mixed typology with 15, 20 and 30 levels considering the earthquake load was analyzed taking into account the soil-structure interaction. For calculating the seismic load, the Equivalent Static Method of NC-46: 2017 was used. Modeling was carried out with ETABS 16.1 software and two variants were analyzed, one with the embedded base, and the other by considering the soil structure interaction using the Winkler model with floor E as classified by NC 46: 2017. The values of oscillation periods, drifts, displacements, as well as requests for bending moments and axial forces in columns and spandrel walls for all study variants were reported and comparison between them was performed. It is concluded that the height has significant influence when analyzing buildings built on soft ground, in accordance with the modification suffered by the relationship between structure periods vibration and the ground.

Key words: Soil-structure interaction; tall buildings; earthquake load; foundation slab

Introducción

La respuesta dinámica de las estructuras ante la acción sísmica es un fenómeno complejo que depende de numerosas variables, entre ellas de la propia estructura, de la respuesta del suelo y su interacción con la cimentación. Los movimientos del suelo son amplificados por la vibración de la estructura en el que el grado de amplificación depende del amortiguamiento propio de la edificación y de la relación entre el periodo de la estructura y el periodo del suelo, de ahí que la intensidad de la vibración esté asociada a las características del movimiento del terreno como de las propiedades dinámicas de la estructura. Las fuerzas de inercia que se originan por la vibración generan esfuerzos y deformaciones que pueden poner en peligro la estabilidad de las edificaciones y modificar la respuesta estructural de las mismas.

De manera general, el análisis de edificaciones bajo la acción de cargas sísmicas se realiza suponiendo que la fuerza que se ejerce, tanto en la base como las equivalentes que actúan en los distintos niveles de la edificación, son independientes de las características de la cimentación. El hecho de considerar que las tensiones y deformaciones ocurridas en el suelo influyen en la respuesta de las estructuras y viceversa es conocido como interacción suelo estructura (ISE).

La consideración de la ISE en el análisis de estructuras ante cargas sísmicas conlleva, en muchos casos, a una reducción de las sollicitaciones en las estructuras, por lo que, el no tomar en cuenta su efecto conducirá, en general, a un diseño conservador. Asimismo, existen situaciones en las que obviar el efecto ISE resulta desfavorable, como es el caso del aumento de las derivas y desplazamientos en el tope de los edificios, aspecto que influye en la distancia mínima necesaria para que dos edificios próximos no choquen durante un sismo. Las observaciones postsísmicas sugieren que la no consideración de la ISE puede ser perjudicial, conduciendo a un diseño inseguro de la superestructura y la cimentación, fundamentalmente en aquellas estructuras que se encuentran cimentadas en suelo blando (Díaz-Guzmán *et al.*, 2012).

Villarraga y demás colaboradores (2006) destacan la importancia de considerar la ISE en los casos en que el periodo de la edificación esté próximo al periodo fundamental del suelo ya que, presumiblemente, es en estos casos donde más se evidencian los efectos provocados por la inclusión de la ISE. En su artículo se realiza un estudio paramétrico de los efectos de la ISE para edificios de 5, 7, 10, 12 y 20 niveles. Se

destaca que, para perfiles de suelo rígidos, el único edificio donde no se encontraron fenómenos de interacción importantes fue el de 20 niveles. Esto se debe a que su periodo de vibración es tan alto que no resonará con los tipos de suelo estudiados.

El estudio de la ISE puede realizarse en condiciones estáticas y también en condiciones dinámicas. El tipo de análisis a realizar estará condicionado por las características de la estructura en cuestión y el fenómeno que se desea modelar. Mientras que las estructuras pueden considerarse casi siempre como sistemas finitos y lineales en un amplio rango de deformaciones, los suelos son esencialmente medios semi-finitos e inelásticos que, en muchos casos, tienen implícito deformaciones experimentadas previamente.

Para la consideración de la ISE existen diferentes métodos y modelos entre los que se encuentra el modelo de Winkler, el cual consiste en considerar al suelo como un número infinito de resortes elásticos, que se comportan independientes entre sí.

No existen suficientes estudios reportados que permitan definir los intervalos de alturas de edificaciones a partir de las cuales es necesaria la consideración de la ISE en el análisis sísmico. Lo anterior puede estar dado fundamentalmente por la cantidad de variables que intervienen en dicha valoración, entre ellas, la tipología estructural, la forma y geometría de la edificación, el tipo de suelo, la profundidad y tipo de cimentación y la zona sísmica que se considere en el análisis (Avilés & Pérez-Rocha, 2004).

El presente trabajo tiene como objetivo determinar la influencia de la altura en la respuesta estructural de edificaciones con tipología mixta ubicadas en zona de alto riesgo sísmico, según los requisitos de la NC 46:2017. Se empleó, para la determinación de las cargas sísmicas, el Método Estático Equivalente. Se realizó la modelación de las edificaciones con el empleo del programa ETABS v. 16.2.1. Para la consideración de la ISE se empleó el modelo de Winkler con el cálculo de las rigideces mediante las formulaciones contenidas en Meli & Bazán (1999), que consideran parámetros relativos al suelo y a la propia estructura de cimentación. Se realizó la comparación de los resultados de solicitaciones y desplazamientos para tres alturas diferentes con la consideración de la ISE en el análisis y sin esta.

Métodos y Materiales

Para realizar el estudio se tomaron tres edificaciones de tipología mixta, con tímpanos distribuidos simétricamente, encargados de tomar las cargas horizontales y las cargas verticales que tributan. Todos los elementos son de hormigón armado fundido *in situ*. Las tres edificaciones presentan iguales características en la que solo cambia la cantidad de niveles: 15, 20 y 30 niveles con una altura de 40,80 m; 54,30 m y 81,30 m, respectivamente.

Las edificaciones se encuentran ubicadas en Santiago de Cuba, región considerada como zona 5 según la NC-46:2017. Estarán destinadas a viviendas.

Descripción de la modelación

Geometría

La estructura consta de 12 módulos de 7,20 x 7,20 m dispuestos de manera regular. La altura del puntal en el primer nivel es de 3,0 m y en los siguientes niveles es de 2,7 m.

Los tímpanos, de 30 cm de espesor, están ubicados en los ejes 1, 3, 5, A y D, tal y como se muestra en la Figura 1.

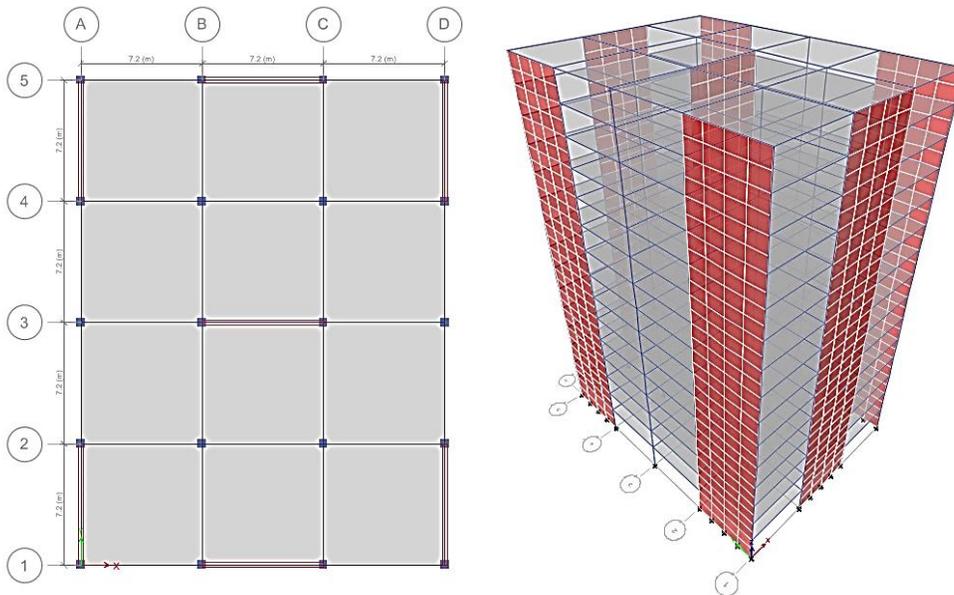


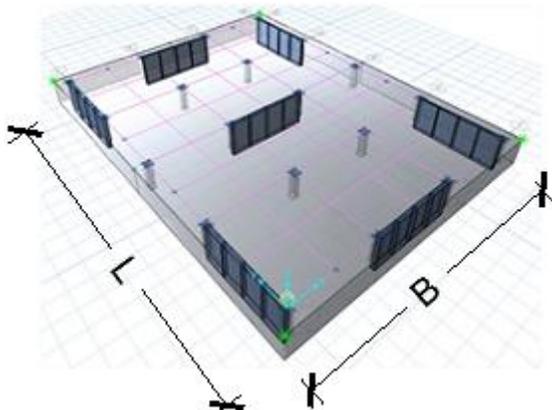
Figura 1. Planta típica con la distribución de tímpanos. Isométrico de la edificación de 15 niveles.

Las vigas tienen una sección transversal de 50 cm x 60 cm, las columnas son de sección cuadrada de 50 cm x 50 cm, las losas tienen un espesor de 20cm.

Para la variante donde se consideró la ISE se modeló una losa de cimentación de hormigón con las características mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones de la losa de cimentación consideradas en el modelo

Losa de cimentación



Niveles	Altura edificación (m)	h(m)	B (m)	L (m)
15	40,8	1,50	23,6	30,8
20	54,3	2,00	23,6	30,8
30	81,3	2,50	25,6	32,8

Material

Todos los elementos son de hormigón armado *in situ*. El hormigón posee un peso específico de 24 kN/m³ y una resistencia a compresión de 30 MPa en todos los elementos estructurales. El módulo de elasticidad es de 25 743 MPa y la relación de Poisson de 0,17.

La losa de cimentación modelada en los casos donde se consideró la ISE presenta igualmente una resistencia a compresión de 30 MPa.

El suelo considerado para el cálculo de las cargas sísmicas y para la inclusión de la ISE es tipo E, que clasifica como arcilla blanda según la NC-46: 2017 y presenta las siguientes propiedades:

Ángulo de fricción: 10°

Módulo de deformación: 12 400 kPa

Peso específico: 11,5 kN/m³

Coefficiente de Poisson: 0,3

Cohesión: 33 kPa.

Condiciones de borde

Se analizaron dos casos: el primero sin considerar la ISE y el segundo teniendo en cuenta los efectos de la ISE. En el primer caso se establecen como condiciones de borde tímpanos y columnas empotradas en su base; en el segundo caso, se modelaron soportes elásticos para considerar la flexibilidad del suelo.

Para ambos casos de estudio, en todos los modelos se considera la unión viga-columna continua. Las columnas y los tímpanos continuos en toda la altura y losas que funcionan como un disco rígido.

Cargas

Se consideraron las cargas permanentes correspondientes al peso propio de los elementos y las indicadas en la (NC-283, 2003) y las cargas de uso incluidas en la (NC-284, 2003). Las cargas determinadas a partir de las normas anteriormente mencionadas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de carga permanente y carga de uso utilizadas

Cargas permanentes	
Material	Carga
Relleno (10 cm de espesor)	0,18 kN/m ² / cm de espesor
Piso (2 cm de espesor)	0,23 kN/m ² / cm de espesor
Impermeabilización (2 capas de papel asfáltico)	0,05 kN/m ²
Cargas de uso	
Elemento	Carga
Entrepiso	2,0 kN/m ²
Cubierta	2,0 kN/m ²

Carga Sísmica (NC-46, 2017)

Zona sísmica: 5

Categoría ocupacional: Categoría II: Obra ordinaria. Construcciones de ocupación normal que pueden tolerar daños estructurales que las hagan inoperables como consecuencia de un sismo severo, sin llegar al colapso parcial o desplome. Se consideran en este grupo las edificaciones destinadas a viviendas.

Nivel de sismo: mínimo básico.

Clasificación del sitio: suelo E.

S_s : Ordenada espectral de periodo corto (1,035).

S_{1s} : Ordenada espectral con periodo de un segundo del sismo extremo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés (0,428).

Ajustes por clase de sitio:

$$S_{CS} = S_s \cdot F_a \quad (1)$$

$$S_{1S} = S_1 \cdot F_v \quad (2)$$

F_a : Coeficiente de sitio para periodos de vibración cortos: 0,90

F_v : Coeficiente de sitio para periodos largos: 2,54

Ajustes por intensidades sísmicas especiales: no requiere ser adicionalmente ajustado por la posibilidad de intensidades incrementadas de vibración. Los valores de N_a y N_v son 1,00 y 1,00 respectivamente, ya que las fallas se encuentran a más de 15 km.

Espectro calibrado al nivel de diseño requerido

El espectro calibrado al nivel de diseño requerido está dado por la siguiente forma:

$$S_{DS} = S_{CS} \cdot K_d$$

$$S_{D1} = S_{1S} \cdot K_d$$

S_{DS} : Aceleración espectral de diseño para período corto

S_{D1} : Aceleración espectral de diseño para período largo

K_d : Factor de escala.

Factor de escala (K_d) acorde a sismo mínimo 20 % de probabilidad de ser excedido en 50 años; $K_d=0,50$.

Atendiendo a las características de la edificación se tomará como nivel de desempeño sísmico: ocupación inmediata para un sismo mínimo, dado que la edificación cataloga como ordinaria. En la Tabla 3 se aprecian los valores de S_{DS} y S_{D1} calibrados al nivel de diseño.

Tabla 3. Coeficientes para el espectro calibrado al nivel de diseño requerido

Nivel de desempeño	Kd	SDS (g)	SD1 (g)
Ocupación inmediata (sismo mínimo)	0,50	0,47	0,54

Periodos de esquina del espectro

Los periodos de esquina del espectro se calculan por las expresiones:

$$T_o = 0,2 * \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} = 5 * T_a$$

Donde:

Ta y Ts son periodos de esquina de espectro.

La Tabla 4 muestra los valores obtenidos.

Tabla 4. Valores de periodo de esquina del espectro

Nivel de desempeño	T _o (s)	T _s (s)
Ocupación inmediata (sismo ordinario)	0,23	1,17

T_L(s): Periodo de transición de periodo largo

Periodo propio de la estructura

El periodo propio de la estructura se determinó mediante el ETABS, considerando la totalidad de las cargas permanentes y el 25 % de las cargas de uso; se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores de periodos de vibración propio de la estructura

Edificaciones		Periodo (s)	
		Sin ISE	
Niveles	Altura (m)	X	Y
15	40,8	1,06	1,03
20	54,3	1,59	1,57
30	81,3	2,79	2,80

Combinaciones de carga (NC-450, 2006; NC-46, 2017)

Se emplearán las combinaciones contenidas en las normas (NC-46, 2017; NC-450, 2006) exceptuando, en esta última, aquellas que incluyan la carga de sismo, ya que en este aspecto la NC-46 (2017) sustituye a la NC-450 (2006).

NC-46: 2017

$$1,2G + Q + S_v + S_h$$

$$1,2G + Q + S_v - S_h$$

$$0,9G - S_v + S_h$$

$$0,9G - S_v - S_h$$

NC-450: 2006

$$1,4G$$

$$1,2G + 1,6Q + 0,5Q_c$$

$$1,2G + 1,6Q_c + 0,5Q$$

Donde:

G: Carga permanente

Q: Carga de uso

Q_c: Carga de Uso de cubierta

S_v= Demanda sísmica vertical

S_h= demanda sísmica horizontal

Siendo $S_v = S_{vD} * G = 0,2 S_{DS} * G$

Proceso de cálculo para la inclusión en el modelo de la ISE

Como se mencionó anteriormente, la interacción suelo-estructura se hará de acuerdo al modelo de Winkler, el cual establece la modelación del comportamiento del suelo a partir de resortes que son independientes unos de otros.

En general, en un sistema suelo-estructura con una cimentación rígida, esta última tiene seis grados de libertad: el desplazamiento horizontal en dos ejes centroidales perpendiculares, la torsión alrededor de un eje vertical y el cabeceo alrededor de los ejes horizontales. En consecuencia, se requieren calcular aquellos coeficientes de rigidez que representan la restricción que el suelo bajo una estructura opone a dichos movimientos. Las formulaciones para el cálculo de estos coeficientes, planteadas por Pais & Kausel (1988), son:

K_v = rigidez equivalente en la dirección vertical

K_x = rigidez equivalente para cada una de las direcciones horizontales de análisis

K_r = dos rigideces equivalentes en rotación con respecto a los ejes centroidales de la base perpendicular a cada dirección que se analiza

K_t = rigidez equivalente en torsión con respecto al eje vertical centroidal de la base.

$$K_v = \frac{GR}{1-\nu} (3,1 * \lambda^{0,75} + 1,6) * \left(1 + \left(0,25 + \frac{0,25}{\lambda} \right) * \eta^{0,8} \right)$$

$$K_x = \frac{GR}{1-\nu} * (6,8 * \lambda^{0,65} + 2,4) + \left(1 + \left(0,33 + \frac{1,34}{1+\lambda} \right) * \eta^{0,8} \right)$$

$$K_y = K_x + 0,8 * G * B * (\lambda - 1) * \left(1 + \left(0,33 + \frac{1,34}{(1+\lambda)} \right) * \eta^{0,8} \right)$$

$$K_{rx} = \frac{G * R^3}{1-\nu} * (3,2 * \lambda + 0,8) * \left(1 + \eta + \frac{1,6}{(0,35+\lambda)} * \eta^2 \right)$$

$$K_{ry} = \frac{G * R^3}{1-\nu} * (3,73 * \lambda^{2,4} + 0,27) * \left(1 + \eta + \frac{1,6}{(0,35+\lambda^4)} * \eta^2 \right)$$

$$K_t = 16 * G * R^3 * (4,25 * \lambda^{2,45} + 0,46) * \left(1 + \left(1,3 + \frac{1,32}{\lambda} \right) * \eta^{0,9} \right)$$

Donde:

G: Módulo de cortante

ν : Coeficiente de Poisson.

R: Radio equivalente

λ : L/B

η : E/B

En la Tabla 6 se muestran los valores obtenidos para cada caso.

Tabla 6. Valores de rigideces asignados a la losa de cimentación

Espesor de losa (m)	Kv (kN/m/m ²)	Kx (kN/m/m ²)	Ky (kN/m/m ²)
1,5	710 959	1 960 629	1 960 629
2,0	786 178	2 255 106	2 255 106
2,5	857 688	2 535 056	2 535 056

Resultados

Los efectos de interacción se traducen en incrementos o reducciones de los parámetros que rigen la respuesta del sistema, ya sean solicitaciones o desplazamientos, en dependencia de la relación entre los periodos de la estructura y el suelo. El periodo del suelo T_s es 1,17s.

Periodo fundamental de vibración de las edificaciones (T)

La Tabla 7 muestra los valores de periodo en el sentido de "X" y "Y" para los modelos con la consideración de la interacción suelo-estructura y sin esta, obtenidos mediante el software ETABS para los edificios de 15, 20 y 30 niveles, respectivamente.

Tabla 7. Valores de periodos de vibración propios de la estructura

Edificaciones		Periodos (s)				Incremento (%)	
Niveles	Altura (m)	Sin ISE		Con ISE		Dirección	
		X	Y	X	Y	X	Y
15	40,8	1,06	1,03	1,10	1,09	3,77	5,82
20	54,3	1,59	1,57	1,61	1,59	1,27	1,27
30	81,3	2,79	2,80	2,83	2,84	1,43	1,43

En la Tabla 7 se refleja que la consideración de la ISE produjo un aumento del periodo de vibración en todos los casos. Lo anterior es debido a la capacidad de deformación del suelo (Avilés & Pérez-Rocha, 2004; Díaz-Guzmán *et al.*, 2012) que propicia la amplificación de la oscilación de la edificación.

Con el incremento de la altura se reducen las diferencias entre los valores de los periodos que se obtienen con la consideración de la ISE y sin esta.

Avilés & Pérez-Rocha (2004) establecen que para $T/T_s > 2$, siendo T el periodo de la edificación y T_s el del suelo, los efectos de la interacción son prácticamente despreciables. La Tabla 8 muestra los valores de la relación T/T_s para los casos analizados.

Tabla 8. Relación T/T_s para cada caso analizado

Niveles	Sin ISE		Con ISE	
	X	Y	X	Y
15	0,91	0,88	0,94	0,93
20	1,36	1,34	1,38	1,36
30	2,38	2,39	2,42	2,43

Esta relación aumenta a medida que se incrementa la altura de la edificación debido a que se mantienen las mismas dimensiones en la planta, que al aumentar la altura la hace más flexible y aumenta el periodo de la estructura. Lo anterior justifica la similitud entre los periodos que se obtienen con la consideración de la ISE y sin esta en las edificaciones de 20 y 30 niveles.

Desplazamiento en el tope de las edificaciones

En las Tablas 9 y 10 se muestran los desplazamientos en el tope para las combinaciones $G+Q+S_v+Sh_x+0.3Sh_y$ y $G+Q+S_v+0.3Sh_x+Sh_y$ en las direcciones de análisis "X" y "Y". Se establece como valor límite permisible el estipulado en la NC 46:2017 que responde a $H/600$, siendo H la altura total de la edificación. Los valores límites son 0,068m; 0,090 m y 0,135 m para los 15, 20 y 30 niveles, respectivamente.

Tabla 9. Desplazamientos para la combinación $G+Q+S_v+Sh_x+0.3Sh_y$

Niveles	Altura (m)	Dirección	Desplazamientos		% diferencia
			Sin ISE (m)	Con ISE (m)	
15	40,8	X	0,033	0,036	9,21
20	54,3		0,041	0,042	3,03
30	81,3		0,098	0,098	0,38
15	40,8	Y	0,035	0,039	12,28
20	54,3		0,043	0,045	3,86
30	81,3		0,104	0,105	0,89

Tabla 10. Desplazamientos para la combinación $G+Q+S_v+0.3Sh_x+Sh_y$

Niveles	Altura (m)	Dirección	Desplazamientos		% diferencia
			Sin ISE (m)	Con ISE (m)	
15	40,8	X	0,065	0,071	9,31
20	54,3		0,087	0,090	3,03
30	81,3		0,125	0,125	0,35
15	40,8	Y	0,063	0,071	12,22
20	54,3		0,084	0,087	3,86
30	81,3		0,123	0,124	0,86

En todos los casos con base empotrada (Sin ISE) los desplazamientos producidos en ambas direcciones de análisis se encuentran dentro de los límites admisibles.

Para los casos en que se considera la interacción suelo-estructura, se supera el límite admisible en la edificación de 15 niveles para la combinación $G+Q+S_v+0.3Sh_x+Sh_y$ y ambas direcciones de análisis en las que se obtienen 0,071 m de desplazamiento, para un valor permisible de 0,068 m. Lo anterior está dado por la similitud entre los

periodos de oscilación obtenidos entre la estructura y el suelo. Para una relación $T/T_s < 1$ los efectos obtenidos con la consideración de la ISE pueden superar a los obtenidos para la base empotrada (Avilés & Pérez-Rocha, 2004).

Con relación a las diferencias que se alcanzan entre los valores de desplazamientos, con la consideración de la ISE y sin esta para una misma altura, se evidencia que los mayores porcentajes están dados para la edificación de 15 niveles y que estos se van reduciendo con la altura de la edificación. Lo anterior es debido a que a medida que aumenta la altura de la edificación, se incrementan los periodos de vibración de estas y se alejan del valor obtenido en el suelo, lo que se traduce en una menor incidencia de la ISE en la respuesta de la edificación.

Derivas

Las Figuras 2, 3 y 4 muestran las derivas por piso para las combinaciones $G+Q+S_v+Sh_x+0.3Sh_y$ y $G+Q+S_v+0.3Sh_x+Sh_y$ en ambas direcciones de análisis.

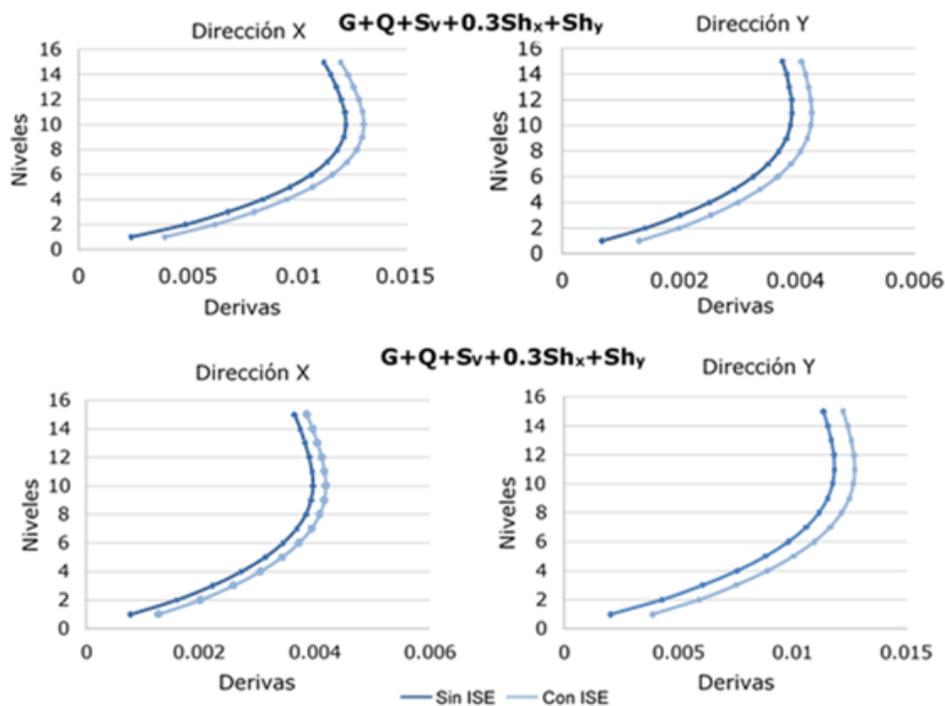


Figura 2. Derivas en la edificación de 15 niveles.

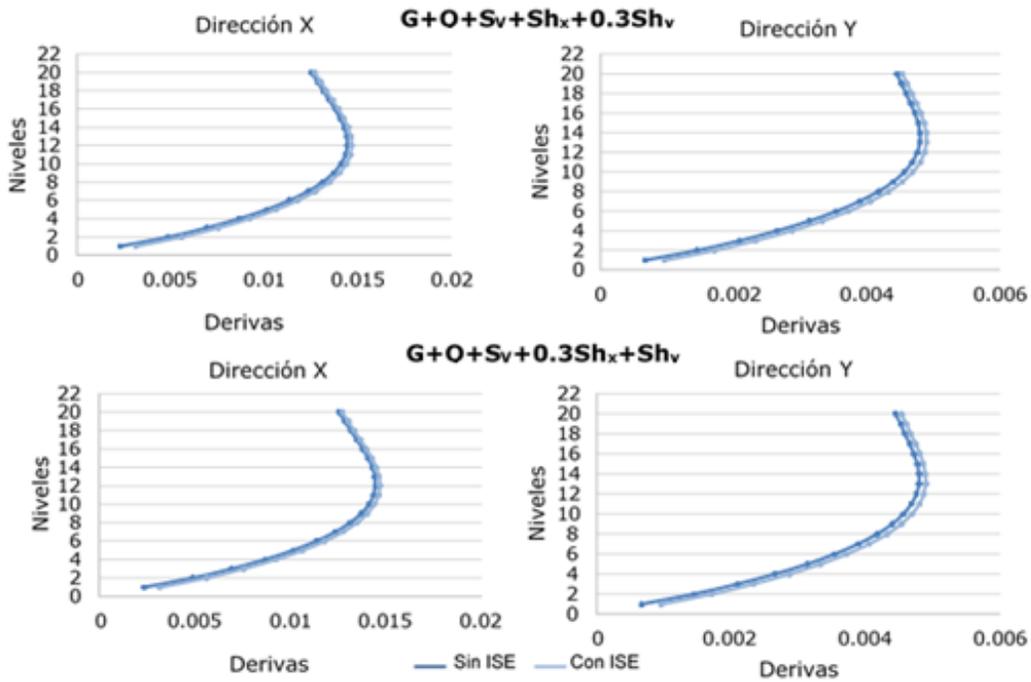


Figura 3. Derivas en la edificación de 20 niveles.

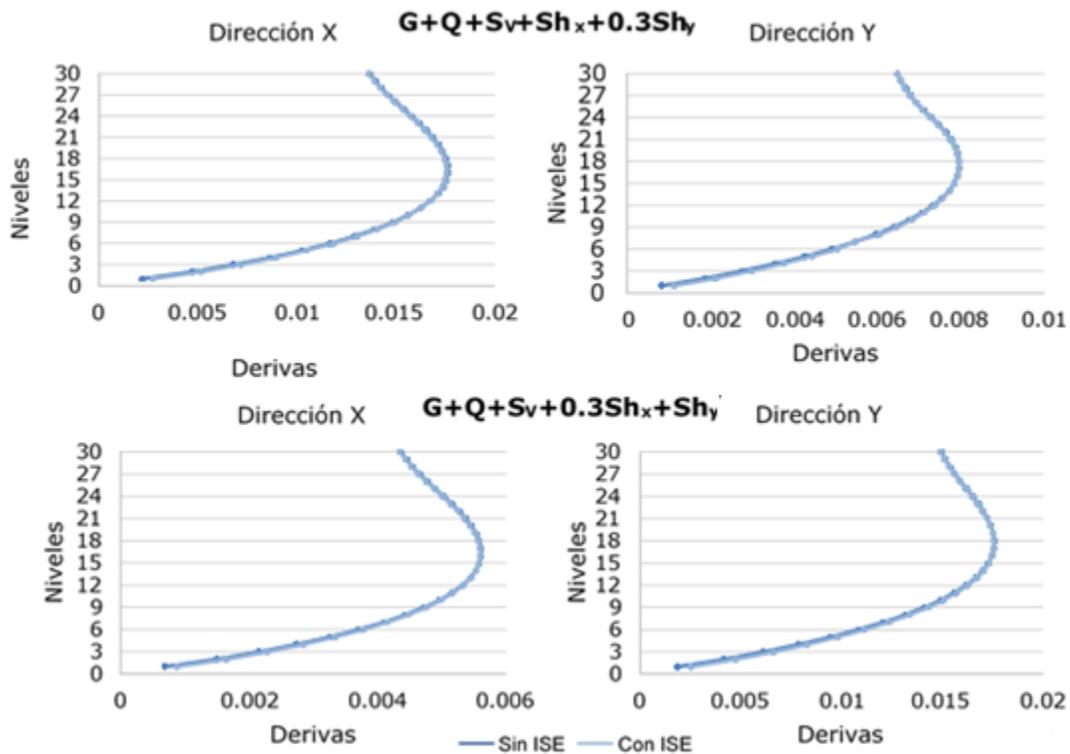


Figura 4. Derivas en la edificación de 30 niveles.

Los resultados representados en las Figuras 2, 3 y 4 demuestran que las derivas por piso aumentan al considerar la ISE. Todos los valores de derivas obtenidos son menores que el valor admisible según la NC-46: 2017, siendo este valor de 0,02.

Se demuestra que los incrementos en los valores de derivas, a partir de la inclusión de la ISE, disminuyen con la altura, siendo apenas perceptibles en el edificio de 30 niveles. Esto se debe a que mientras mayor es la altura de la edificación, mayor es el periodo de oscilación de esta, alejándose así del periodo fundamental del suelo.

En la Tabla 11 se muestran los porcentajes de incremento en los valores de derivas en el primer nivel, para cada uno de las edificaciones analizadas al incluir la ISE.

Tabla 11. Porcentajes de incremento en los valores de derivas por piso al incluir la ISE

		Porcentajes de incremento Niveles		
Combinación	Dirección de análisis	15	20	30
G+Q+Sv+Shx+0.3Shy	X	62,73	35,42	24,25
	Y	93,38	44,36	35,54
G+Q+Sv+0.3Shx+Shy	X	63,23	36,55	27,01
	Y	90,39	44,62	36,51

Los mayores porcentajes de incremento se evidencian para la edificación de 15 niveles, reduciéndose estos, al igual que los casos anteriores, con la altura de la edificación.

Solicitaciones

En las Figuras 5 y 6 se muestran los valores máximos de solicitaciones por elementos para cada edificación y los porcentajes de incremento o reducción.

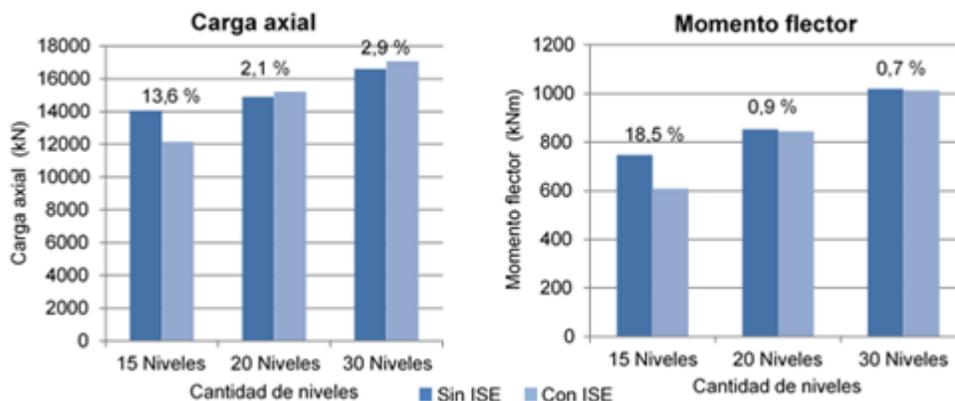


Figura 5. Solicitaciones en la columna más esforzada en cada modelo analizado con la consideración de la ISE y sin esta.

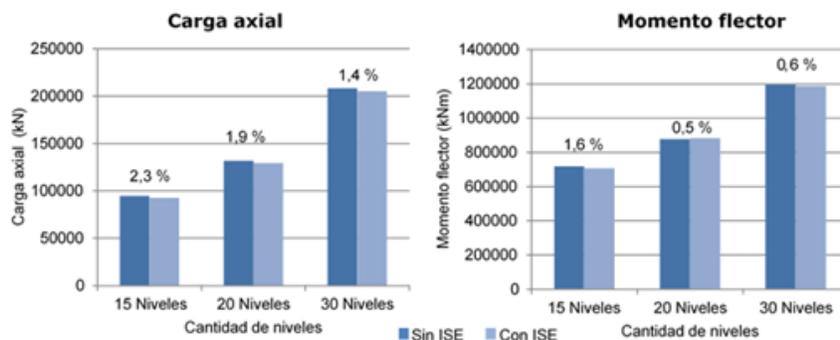


Figura 6. Solicitaciones en el tímpano más esforzado en cada modelo analizado con la consideración de la ISE y sin esta.

En las columnas, tanto la fuerza axial como el momento flector, disminuyen para el edificio de 15 niveles al considerar la ISE, lo cual se asocia al amortiguamiento propio del suelo que permite que el mismo absorba parte de la energía liberada por el sismo, haciendo que esta no llegue a la superestructura. Para los edificios de 20 y 30 niveles la fuerza axial aumenta al considerar la ISE en valores que no superan el 3 %.

Para el caso del momento flector en la base de las columnas el valor disminuye al considerar la ISE para los tres casos analizados. Se destaca que para las edificaciones de 20 y 30 niveles las diferencias no alcanzan el 1 %.

En los tímpanos, tanto la fuerza axial como el momento flector se reducen al considerar la ISE. El mayor porcentaje de diferencia se reporta para la edificación de 15 niveles, aunque en los casos analizados las diferencias no superan el 3 % y el 2 % para la carga axial y el momento flector, respectivamente. Lo anterior se debe a la alta rigidez que presentan los tímpanos como elementos estructurales encargados de tomar los esfuerzos horizontales.

Conclusiones

El desarrollo de la investigación permite establecer que con el incremento de la altura aumenta la relación entre el periodo de la estructura y el suelo, de ahí que la consideración de la ISE en el análisis:

Produce el aumento del periodo de vibración para las tres alturas analizadas, con mayor diferencia para el caso de 15 niveles.

Incrementa los valores de derivas y desplazamiento en el tope de las edificaciones para las tres alturas analizadas. La edificación de 15 niveles no cumple con el desplazamiento lateral permisible.

Reduce las solicitaciones de carga axial en las columnas de la edificación de 15 niveles en un 13 % por ciento.

Aumenta la carga axial en las columnas de las edificaciones de 20 y 30 niveles en porcentajes que no superan el 3 %.

Reduce los valores de momento flector en la base de las columnas con diferencias de un 18 % para la edificación de 15 niveles y menos del 1 % para 20 y 30 niveles.

Reduce la carga axial y momento flector en los tímpanos para las tres edificaciones con porcentajes menores para el caso de 20 y 30 niveles con hasta 2 % y 1 %, respectivamente.

Lo anterior permite definir que, para la situación analizada, el incremento de la altura de las edificaciones implica la reducción del efecto de la ISE en los valores de solicitaciones y desplazamientos dado que aumenta la relación entre el periodo de la estructura y el suelo.

Referencias bibliográficas

NORMA CUBANA NC 283. 2003. Densidad de materiales naturales, artificiales y de elementos de construcción como carga de diseño. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba.

NORMA CUBANA NC 284. 2003. Edificaciones. Carga de uso. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba.

NORMA CUBANA NC 450. 2006. Edificaciones. Factores de carga o ponderación. Combinaciones. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba.

NORMA CUBANA NC 46. 2017. Construcciones sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba.

- AVILÉS, J. & PÉREZ-ROCHA, L. E. 2004. Bases para las nuevas disposiciones reglamentarias sobre interacción dinámica suelo-estructura. *Revista de Ingeniería Sísmica* 71: 1-36.
- DÍAZ-GUZMÁN, F. D.; ESPINOZA-BARRERAS, F.; SÁNCHEZ-VERGARA, R. & HUERTA-LÓPEZ, C. I. 2012. *Respuesta dinámica de un edificio considerando el efecto de interacción suelo-estructura*. Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE), Barcelona, España. ISBN 978-84-939640-1-6.
- MELI, R. & BAZÁN, E. 1999. *Diseño Sísmico de Edificios*. LIMUSA, Noriega Editores, México.
- PAIS, A. & KAUSEL, E. 1988. Approximate formulas for dynamic stiffnesses of rigid foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 7(4): 213-227.
- VILLARRAGA, M. R.; PINEDA, M.; RAMÍREZ, A. F. & RAMÍREZ, C. E. 2006. Estudio paramétrico de los efectos de la interacción sísmica suelo-estructura. IV Encuentro Nacional de Ingenieros de Suelos y Estructuras. Foro Internacional sobre Microzonificación Sísmica. Bogotá, Colombia.