

7

Artículo de Investigación

Métodos Para Simular La Interacción Suelo Estructura En Un Edificio De 100 Metros De Altura

Methods To Simulate Soil-structure Interaction In A 100-meter High Building

Autores

Daniel Cobelo Puldón

Ing. Universidad Tecnológica de la Habana (CUJAE)

eng.danielcobelo@gmail.com

<http://orcid.org/0009-0002-9794-8860>

Aldo Fernández Limés

Ing. MSc. Universidad Tecnológica de la Habana (CUJAE)

afernandez@civil.cujae.edu.cu

<http://orcid.org/0009-0003-1216-4355>

Willian D. Cobelo Cristiá

Dr. Universidad Tecnológica de la Habana (CUJAE)

wcobelo@civil.cujae.edu.cu

<http://orcid.org/0009-0003-1532-8167>

Métodos Para Simular La Interacción Suelo Estructura En Un Edificio De 100 Metros De Altura

RESUMEN

El efecto de redistribución de esfuerzos que ocurre producto a los asentamientos es un factor importante a analizar en edificaciones de gran altura. Para considerarlos es necesario incluir en los análisis estructurales el efecto de la interacción suelo-estructura (ISE). En esta investigación se analizan los efectos de la ISE en un edificio de 100 m de altura sobre estratos de suelos compresibles a través de dos métodos, directo e indirecto; y la no consideración mediante apoyos rígidos. Con el objetivo de obtener la variación en los desplazamientos horizontales, los asentamientos, las fuerzas interiores de columnas y la carga axial sobre los pilotes en los modelos con y sin ISE. Para representar la ISE mediante el método directo se crean elementos de interfase entre el suelo y la cimentación. Por otro lado, a partir de la incorporación de resortes y proporcionando el coeficiente de balasto se tiene en cuenta la ISE por el método indirecto. Los resultados muestran que la ISE tiene un efecto considerable en el aumento de los desplazamientos horizontales, provoca un aumento de las fuerzas interiores de las columnas, se evidencia la variación en la fuerza axial en los pilotes producto a la acción de la fuerza de fricción y se comprueba que mediante la utilización del método directo se logra una mejor representación del comportamiento de la estructura ya que este permite analizar el trabajo conjunto de los elementos que conforman la cimentación y el suelo, mientras que en el método indirecto estos elementos trabajan individualmente.

Palabras clave: calibración numérica, elementos finitos, interacción suelo estructura, método directo, método indirecto.

ABSTRACT

The effect of stress redistribution that occurs because of settlement is an important factor to be analyzed in high-rise buildings. To consider them, it is necessary to include in the structural analysis the effect of soil-structure interaction (SSI). In this research, the effects of ISE in a 100 m high building on compressible soil strata are analyzed through two methods, direct and indirect; and the non-consideration by rigid supports, to obtain the variation in horizontal displacements, settlements, column internal forces and axial load on the piles in the models with and without SSI. To represent the SSI by the direct method, interface elements are created between the soil and the foundation. On the other hand, by incorporating springs and providing the subgrade reaction modulus, the SSI is taken into account by the indirect method. The results show that the SSI has a considerable effect on the increase of the horizontal displacements, causes an increase of the interior forces of the columns, the variation in the axial force in the piles is evidenced as a result of the action of the friction force and it is verified that by using the direct method a better representation of the behavior of the structure is achieved since it allows analyzing the joint work of the elements that make up the foundation and the soil, while in the indirect method these elements work individually.

Keywords: direct method, finite elements, indirect method, numerical calibration, soil-structure interaction

Nota Editorial: Recibido: 26 de Octubre 2025 Aceptado: 1 de Diciembre 2025

1. INTRODUCCIÓN

La interacción suelo estructura (ISE) resulta de mucho interés en el diseño de los soportes horizontal y vertical de una estructura. El tipo de cimentación y las propiedades mecánicas del suelo que la sustenta, determinan los efectos que estas variables producen en la superestructura. El suelo de soporte bajo las cimentaciones experimenta deformaciones producto a la expulsión de aire o agua de los poros del suelo y a la deformación y reacomodo plástico de las partículas. Por lo que conociendo la relación carga-deformación puede proponerse un diseño de cimentación que minimice los asentamientos considerando este efecto en el diseño de los elementos que conforman la estructura. [1]

Para representar este fenómeno se han desarrollado métodos que se basan en la hipótesis de Winkler, que sustituye al suelo por un grupo de resortes con un coeficiente de rigidez (k) determinado. Investigaciones como las realizadas por Cavalieri, et al. [2] y Boada-Fernández, et al. [3] utilizan este método para incluir en el análisis el comportamiento del suelo. Estudios más recientes como los realizados por Shirkhanghah and Kalehsar [4] y Almaguer Miranda and Cobelo Cristiá [5] utilizan modelos numéricos computacionales para representar el comportamiento del suelo, modelando a este y a la estructura de manera íntegra, creando elementos de interfase para simular el comportamiento en la frontera de los materiales que conforman tanto el suelo como la estructura.

Estos dos métodos son constantemente utilizados en estudios para modelar la interacción suelo-estructura e incluso son comparados entre sí, evidenciándose las desventajas que presenta los modelos basados en la hipótesis de Winkler con respecto a los continuos.

En esta investigación se analiza una edificación de 100 m de altura apoyada sobre estratos de suelos compresibles, modelada en el programa con base en el método de los elementos finitos MIDAS GEN, el cual simula configuraciones para todo tipo de condiciones del terreno utilizando métodos de análisis como el estático lineal/no lineal, el análisis dinámico lineal/no lineal, análisis de infiltración y consolidación, y análisis de seguridad de taludes. Estudios como los realizados por Saini and Goyal [6] y Cao and Hang [7] usan este programa computacional como herramienta para análisis de cimentaciones. La ISE fue considerada a través de dos métodos: directo e indirecto y la no consideración de su efecto fue mediante apoyos rígidos. Con el objetivo de obtener la variación de los desplazamientos horizontales, asentamientos, las fuerzas interiores de columnas y la carga axial sobre los pilotes entre los modelos con y sin ISE

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El edificio objeto de estudio para los análisis de ISE es un edificio de hormigón armado con 27 niveles y dimensiones en planta de 30 x 30 m con una altura (H) de 100 m. La tipología constructiva utilizada es la de losas apoyadas sobre columnas con tímpanos en la zona central con un espesor de pared de 0,35 m. Las secciones transversales de las columnas disminuyen con la altura del edificio desde secciones de 1,25 x 1,15 m hasta secciones de 0,70 x 0,45 m. En la figura 1 se muestra el modelo numérico tridimensional del edificio elaborado en Midas Gen y su distribución en planta.

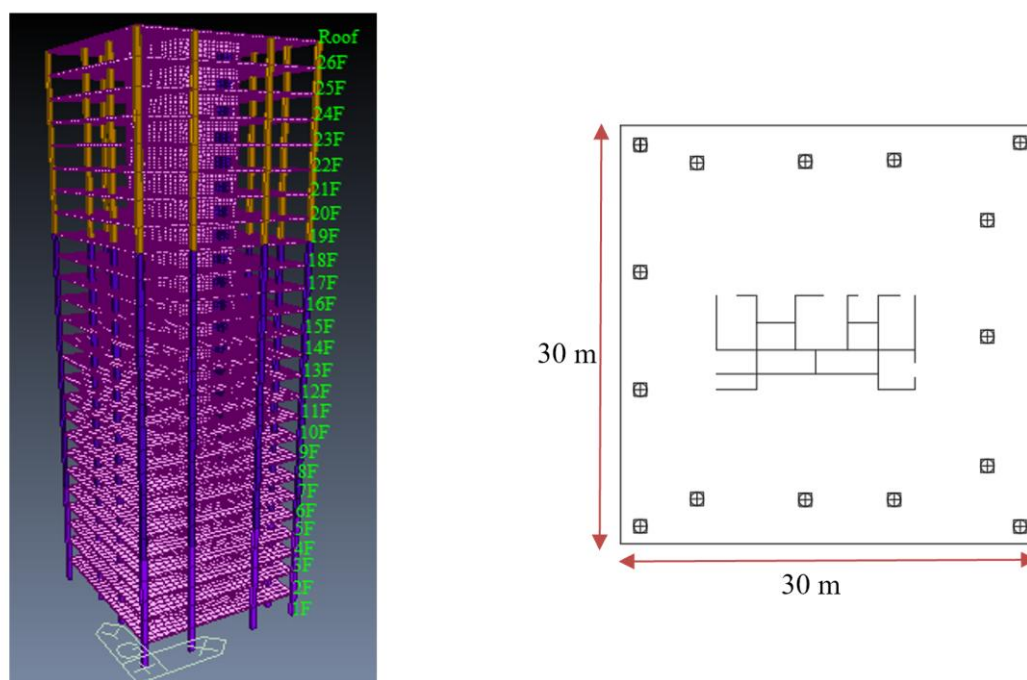


Fig. 1- Edificio de 100 m de altura.

Para el análisis, diseño y modelación de la cimentación y el efecto de la ISE es necesario analizar el perfil estratigráfico del subsuelo. La capa superior es una arcilla muy dura con espesor de 40 m, representada por el modelo constitutivo Mohr Coulomb, debajo de esta subyace un estrato de roca sedimentaria (clástica conglomerada), representada por el modelo Hoek Brown. Las propiedades de estos materiales se muestran en las tablas 1 y 2.

Tabla 1- Propiedades del estrato de arcilla.

Tipo de suelo	Modelo constitutivo	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)	Módulo de elasticidad (kPa)	Peso específico (kN/m ³)	Coef. de Poisson
Arcilla	Mohr-Coulomb	81	21	40000	17	0,3

Tabla 2- Propiedades del estrato de roca.

Tipo de suelo	Modelo constitutivo	Coeficiente “s”	Coeficiente “m”	Compresión uniaxial (kPa)	Peso específico (kN/m ³)	Coef. de Poisson
Roca	Hoek Brown	0,11	22	70	23	0,1

Las cargas actuantes sobre el edificio fueron las gravitatorias y el viento (W), este último aplicado en una sola dirección y distribuida linealmente sobre los entrepisos. Las fuerzas de viento se determinaron mediante el método estático equivalente del factor efecto de ráfaga. En el caso de las gravitatorias se dividieron en: peso propio (G), carga de uso de entrepiso (Q) (1,5 kN/m²) [8], carga de uso de cubierta (Q) (1 kN/m²) [8], carga permanente (G) (2 kN/m²) [9] y se distribuyeron en las plantas de la edificación.

Como solución de cimentación se tiene una losa de hormigón armado de lados 32 x 32 m y un espesor de 1,5 m combinada con pilotes circulares hormigonados *in situ* a una profundidad de 15 m espaciados a 2,46 m y con un diámetro de 0,5 m. Las uniones entre los pilotes y la losa de cimentación se consideraron continuas, al igual que las uniones entre la edificación y la losa.

Como parte de la investigación se analiza también a la edificación con apoyos rígidos. Para esto se colocan en la losa de cimentación restricciones de desplazamiento y giro en todos los sentidos para así garantizar un empotramiento en la base y despreciar el efecto que provoca que esta esté apoyada sobre un estrato compresible.

2.1. MÉTODO INDIRECTO

La modelación de la interacción suelo-estructura utilizando el método indirecto consiste en la colocación de resortes, tanto en la losa de cimentación como en los pilotes. Estas restricciones se consideran resortes con una rigidez (K) que simula el comportamiento del suelo en el que se apoya la edificación. La rigidez se obtiene en las dos direcciones, vertical y horizontal, empleando el coeficiente de balasto vertical y horizontal del suelo.

Para la obtención del coeficiente de balasto vertical del suelo (k_s) es necesario la realización de un ensayo de placa. Este es un ensayo costoso, por ello normalmente en estudios geotécnicos se recurre a tablas para la determinación de su valor. En este estudio se utiliza la propuesta por Salas [10], que muestra el coeficiente de balasto para un ensayo de carga utilizando una placa con diámetro igual a 30 cm (K_{30}).

El estrato donde se apoya la edificación es de arcilla muy dura, por lo que está dentro del rango de 40 a 80 MN/m³. Para este estudio se toma el valor de 60 MN/m³ para realizar el análisis. Una vez obtenido el valor de K_{30} se corrige este valor atendiendo a las dimensiones reales de la losa de cimentación, a través de la ecuación 1 propuesta por Rodríguez Ortíz [11], siendo B el lado de la losa de cimentación (m).

$$k_s = \frac{K_{30} \cdot 0,3}{B} \quad (1)$$

$$K_h = 0,65 * \frac{Es}{D * (1 - \nu^2)}^{1/2} \sqrt{\frac{Es * D}{Ep * Ip}} \quad (2)$$

Donde Es es el módulo de elasticidad del suelo (kPa), D el diámetro del pilote (m), ν el coeficiente de Poisson del suelo, Ep el módulo de elasticidad del pilote (kPa) y Ip el momento de inercia del pilote (m⁴)

Similar a la losa, en la punta del pilote se calcula el coeficiente de balasto vertical utilizando la ecuación 1. Los resultados del cálculo del coeficiente de balasto se muestran en la tabla 3.

Tabla 3- Coeficientes de balasto.

Elemento	$ks \text{ (kN/m}^3\text{)}$	$K_h \text{ (kN/m}^3\text{)}$
Losa	560	-
Pilotes	36000	42660

Luego de obtenidos estos coeficientes se determina la rigidez de los muelles (k) en función del área que tributa a cada nodo donde se ha colocado el resorte, para ello se aplica la ecuación 3.

$$k = K_s * At \quad (8)$$

Donde At es el área tributaria a cada nodo (m²), que para el caso de la punta y el fuste del pilote se utilizó el área de la sección transversal y el área lateral respectivamente.

2.2. MÉTODO DIRECTO

En el método directo para lograr la ISE se modela la edificación en Midas GEN y se acopla a la estratigrafía del terreno mediante el empleo del programa con base en elementos finitos Midas GTS NX, representando los dos estratos que conforman el perfil del suelo. La dimensión horizontal del dominio del suelo se tomó igual a 2,5 veces la altura de la edificación, luego de ser calibrado matemáticamente y descartada la influencia de las condiciones de borde en las deformaciones del terreno. Se colocan elementos de interfase en las uniones losa-suelo y pilotes-suelo. Luego, se aplican los diferentes estados de carga a los que se somete la edificación, a través de etapas constructivas.

En esta investigación se emplea una malla no estructurada híbrida como se muestra en la figura 2. Ya que esta permite un refinamiento localizado que, en este caso, se define alrededor de la zona de interacción cimentación-suelo, reduciendo el tamaño total de la malla, lo que resulta en menor tiempo de cálculo.

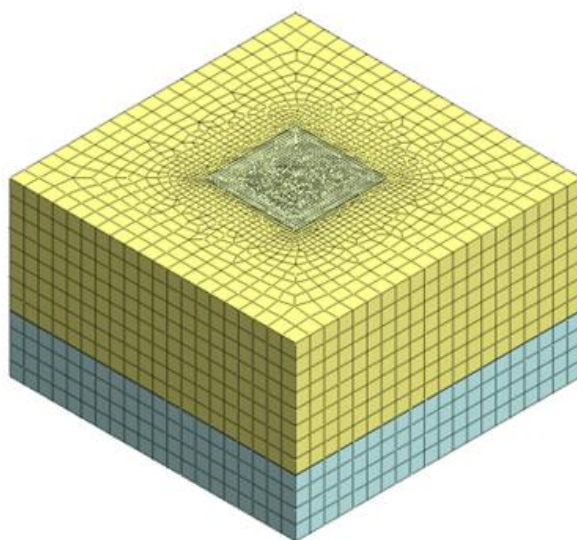


Fig. 2- Malla no estructura utilizada.

Para considerar el efecto de la interacción suelo-estructura en esta investigación, el programa utilizado (MIDAS GTS NX) crea elementos de interfase que permiten los desplazamientos normales y tangenciales al plano entre los nodos comunes de la cimentación y el suelo.

En la losa de cimentación se colocan elementos de interfase cuyos parámetros se obtienen a partir de las propiedades de los elementos adyacentes. En este caso la creación de los elementos de interfase separa los nodos que estaban conectados en una posición y crea un elemento nuevo entre el suelo y la losa. La interfase depende de la rigidez de los elementos adyacentes a través de los módulos de rigidez normal (K_n), (Ecuación 4) y tangencial (K_t) (Ecuación 5), que a su vez dependen de la cohesión, el módulo de cortante y el módulo edométrico reducidos (Ecuaciones 6 a 8).

$$K_n = E_{oed,i} / t_v \quad (4)$$

$$K_t = G_i / t_v \quad (5)$$

$$C_i = R * C_{suelo} \quad (6)$$

$$G_i = R * G_{suelo} \quad (7)$$

$$E_{oed,i} = \frac{2 * G_i (1 - v_i)}{(1 - 2v_i)} \quad (8)$$

Donde v_i es el coeficiente de Poisson de la interfaz que vale 0,45, R el coeficiente de reducción de rigidez, donde en este caso se toma un valor de 0,8 correspondiente a la interacción entre la arcilla y el hormigón, C_i , G_i y $E_{oed,i}$ son la cohesión, el módulo cortante y el módulo edométrico reducido y t_v es el espesor virtual de la interfaz, que se toma un valor igual a 0,01.

En los pilotes también se utilizan los elementos de interfase para permitir el desplazamiento relativo y el comportamiento de fricción entre estos y el suelo. Para este caso la creación de la interfaz se realizó mediante la herramienta del programa Pile/Pile Tip, la que utiliza las propiedades tanto del fuste como de la punta del pilote. Para el fuste se utilizaron valores de K_n , K_t y fuerza cortante máxima (USF, por sus siglas en inglés) mostrado en la ecuación 9 y para la punta se usó la capacidad de carga (TBC), calculada a partir del método de Janbu, así como la rigidez de la punta del pilote (TSS) (Ecuación 10).

$$USF = \frac{Qu}{L * P} \quad (9)$$

$$TSS = \frac{TBC}{0.0254} \quad (10)$$

Donde Qu es la capacidad última del pilote (kN), L la longitud del pilote (m), P el perímetro de la sección transversal del pilote (m) y 0,0254 el desplazamiento límite relacionado a la capacidad de carga última en la punta del pilote (m).

Las condiciones de fronteras que se utilizan en el modelo restringen los desplazamientos en los contornos del dominio como se muestra en la figura 3. También se le aplica una restricción a la rotación que se coloca a lo largo de los pilotes para simular su comportamiento, ya que estos elementos no se enfrentan a la sollicitación de torsión durante su vida útil.

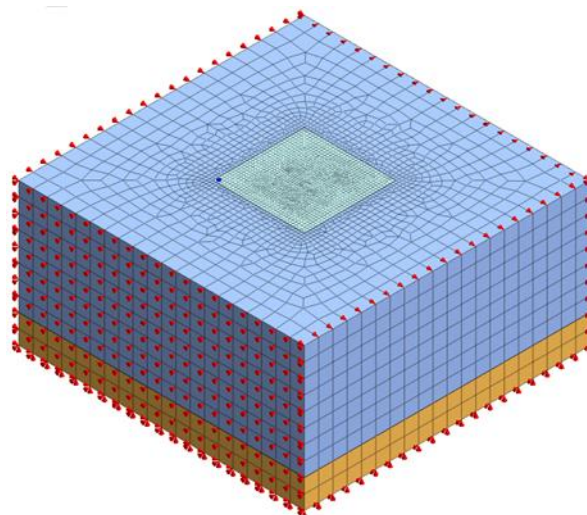


Fig. 3- Condiciones de contorno del modelo.

El análisis de los diferentes estados de cargas se hizo mediante etapas constructivas, donde se adiciona cada uno de los estados de esfuerzo que se crean según su orden de ocurrencia. Partiendo de considerar los estados tensionales y deformacionales que se generan en la etapa anterior. En esta investigación se utilizaron cuatro etapas para simular los distintos estados de carga de la edificación y analizar los resultados en cada una de estas; la etapa “Inicial” que simula el comportamiento inicial del suelo en su estado natural antes de iniciar la construcción; “Cimentación” donde se tiene en cuenta el peso propio de la solución de cimentación y las propiedades de la interfase entre los elementos; “Edificio” en la que se aplican todas las cargas gravitatorias a la estructura. (Peso propio, carga permanente, carga de uso de entepiso y carga de uso de cubierta) y por último la etapa “Carga de viento y gravitatoria” donde se analiza todas las cargas gravitatorias de la estructura y la carga de viento que actúa sobre esta.

3. RESULTADOS

Fue analizada la influencia del efecto de la interacción suelo-estructura sobre las fuerzas interiores y los desplazamientos de la edificación objeto de estudio, mediante el empleo del método directo, el indirecto y con apoyos rígidos. Las solicitaciones analizadas son la carga axial y la fuerza cortante en columnas exteriores e interiores, los desplazamientos horizontales por cada nivel de la edificación, el asentamiento de la losa de cimentación y la carga axial sobre los pilotes.

3.1. CARGA AXIAL EN COLUMNA

La carga axial es una de las solicitaciones a tener en cuenta durante el diseño de las columnas o la cimentación. En esta investigación se evalúa esta fuerza interior seleccionando como referencia una columna exterior y otra interior, en la figura 4 se muestra la ubicación de cada una de ellas.



Fig. 4- Ubicación de las columnas analizadas a) Columna interior b) Columna exterior.

Para este análisis solo se tuvo en cuenta la combinación que incluye las cargas gravitatorias de la estructura (G+Q), en la figura 5 se muestran los valores de fuerza axial para la columna ubicada en una de las esquinas de la edificación y en la figura 6 para la columna interior. Este análisis se realizó para todos los niveles con el objetivo de determinar la variación de esta solicitación con la disminución de la altura.

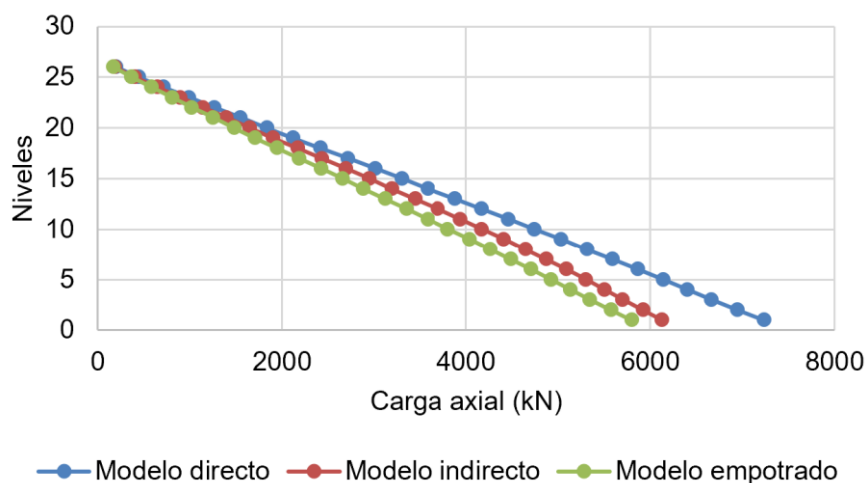


Fig. 5- Carga axial de columna de esquina para los diferentes niveles de la edificación.

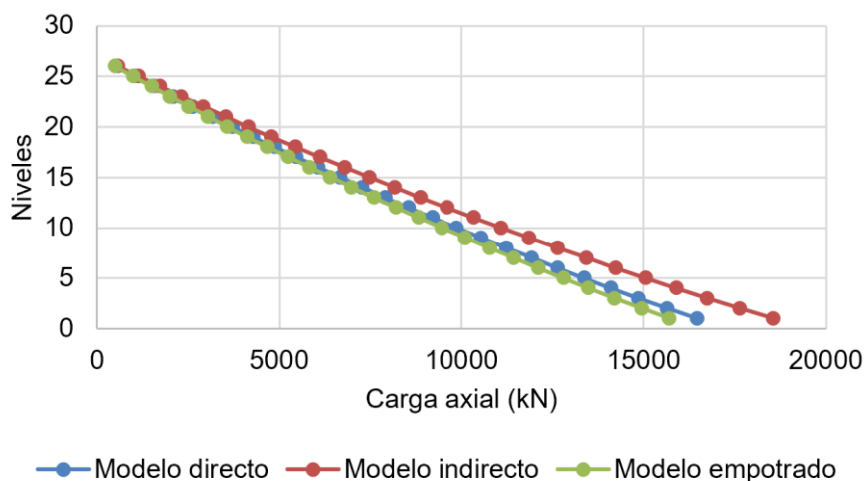


Fig. 6- Carga axial de columna interior para los diferentes niveles de la edificación.

De los resultados obtenidos en las figuras 5 y 6 se aprecia que al considerar la ISE se obtiene un aumento de la carga axial en los niveles más bajos de la edificación. En la columna de esquina seleccionada, considerando la interacción mediante el método directo, aumenta esta solicitación hasta un 20 % con respecto al modelo empotrado. Mientras que utilizando el método indirecto aumenta en un 5 %. Para la columna interior no existe gran diferencia entre el modelo directo y el empotrado, mientras que el modelo indirecto ofrece los mayores valores de carga axial superando en un 12 % la carga determinada por el modelo directo. Estas variaciones de fuerza axial, teniendo en cuenta que las cargas son iguales en cada modelo, se deben a que, considerando la ISE, ocurren asentamientos no uniformes en la cimentación, lo que provoca un cambio en la rigidez del suelo. Provocando a su vez una redistribución de los esfuerzos entre los elementos de soporte vertical en función del método que fue concebido para la determinación de estas rigideces.

Los resultados alcanzados en la investigación demuestran la necesidad de evaluar el efecto de la interacción suelo-estructura en aras de lograr diseños seguros y económicos, ya que los modelos empotrados demandan soluciones de cimentación que restringen el valor de los asentamientos y esto conllevaría a altos costos de construcción.

3.2. FUERZA CORTANTE EN COLUMNA

El efecto de la fuerza cortante también fue evaluado en las mismas columnas donde se evaluó la carga axial, en este caso considerando la combinación de carga que incluye el viento ($G+Q+W$). En las figuras 7 y 8 se muestran los valores de fuerza cortante para la columna de esquina e intermedia en todos los niveles de la edificación.

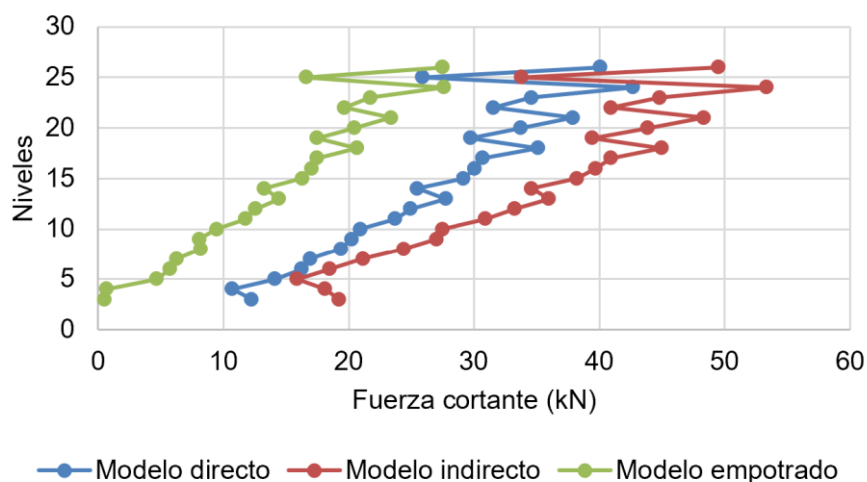


Fig. 7- Fuerza cortante de columna de esquina por niveles.

1. INTRODUCCIÓN

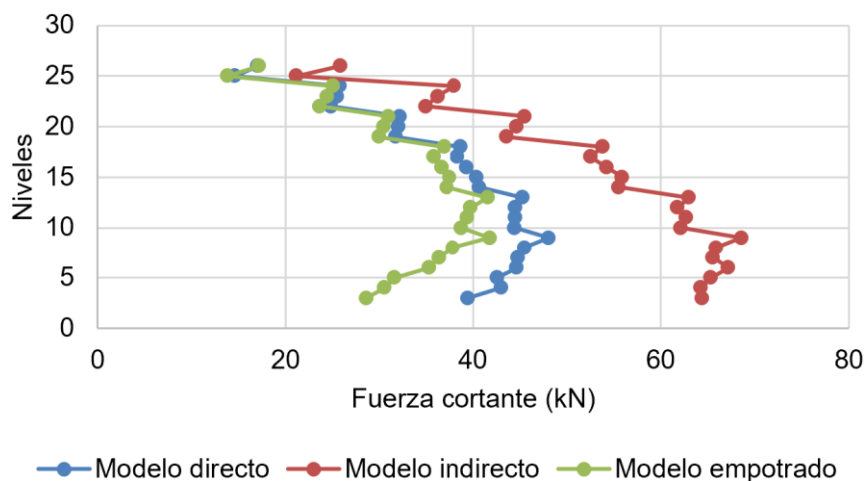


Fig. 8- Fuerza cortante de columna intermedia por niveles.

En la figura 8 se muestra que en la columna interior al igual que la de esquina los máximos valores de fuerza cortante lo ofrecen el modelo indirecto, en este caso en mayor magnitud superando los valores del modelo directo en un 30 %. Las diferencias entre las fuerzas cortantes de los modelos con ISE y sin esta se debe al desplazamiento horizontal y la rotación que tiene lugar en la cimentación por la acción de las cargas horizontales. La consideración de este efecto en los modelos con ISE produce además un mayor desplazamiento en los elementos de soporte vertical (columna). Esto incrementa los momentos flectores en las uniones rígidas y se desarrollan mayores fuerzas cortante. Al ser menos precisa la determinación de la rigidez lateral del suelo mediante la aplicación del método indirecto conlleva al incremento de los valores de la acción de cortante en las columnas.

3.3. DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL

Otro de los resultados a tener en cuenta durante el diseño de una edificación son los desplazamientos horizontales, ya que estos deben estar entre los valores permisibles establecidos. Demostrándose la influencia que presenta la interacción suelo-estructura en los desplazamientos horizontales de la edificación, analizando la combinación que incluye la carga de viento (G+Q+W). Para esto se determina el valor del desplazamiento en la dirección que incide la carga de viento en cada uno de los niveles de la edificación. En la figura 9 se presenta los resultados de este análisis.

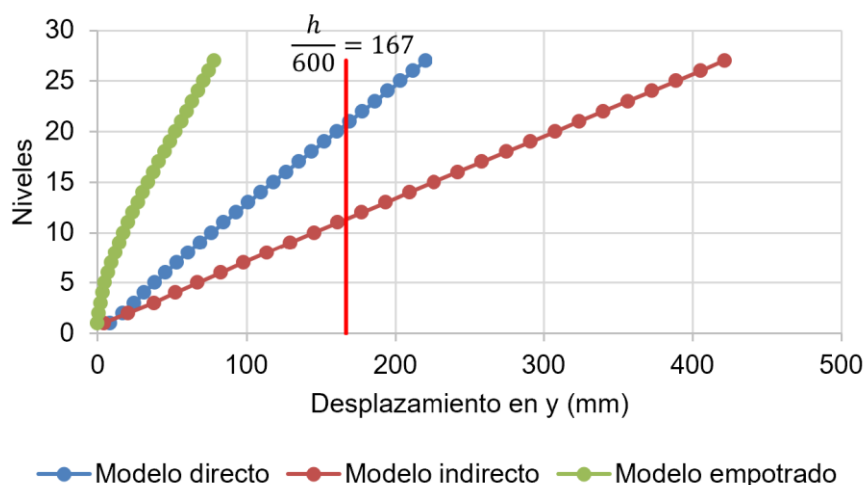


Fig. 9- Desplazamiento para los diferentes niveles de la edificación.

En la figura 9 se aprecia como el modelo empotrado ofrece los menores valores de desplazamiento, lo que no simula con exactitud el comportamiento real de la estructura o demanda el diseño de soluciones de cimentación muy costosas. Esto se debe a que los desplazamientos horizontales son proporcionales a la rigidez tanto de la estructura como del suelo y, al considerarse la unión en la base de las columnas empotradas, no se tiene en cuenta la rigidez real del suelo.

Por otro lado, se evidencia que el modelo indirecto de interacción suelo-estructura es conservador con respecto al directo, en este último los valores de desplazamiento máximo se duplican en el tope de la estructura. Además se muestra en el gráfico el valor admisible de desplazamiento horizontal atendiendo a la NC-46 [13] y se observa que los modelos con ISE sobrepasan este límite, por lo que se recomienda aumentar su rigidez, modificando la sección transversal de las columnas.

3.4. ASENTAMIENTO EN LA LOSA DE CIMENTACIÓN

El control de los asentamientos de la cimentación y su distribución influyen directamente en la redistribución de las fuerzas interiores en todos los elementos estructurales de una edificación. Permite además controlar los daños a la estructura en la condición de servicio, por lo que el pronóstico de los asentamientos demanda tener en cuenta todas las variables que influyen sobre el valor final de este parámetro. En la figura 10 se muestran los valores máximos de asentamiento absoluto en el centro de la losa de cimentación combinada con pilotes.

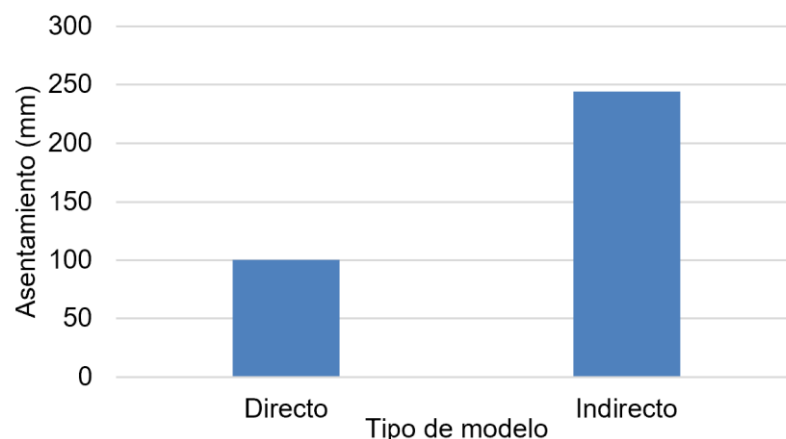


Fig. 10- Asentamiento absoluto en el centro de la losa de cimentación.

Entre los modelos que incluyen la interacción suelo-estructura, se evidencia una diferencia significativa en el valor de los asentamientos, siendo el modelo indirecto donde se tienen los valores máximos de este parámetro, superando a los que se obtienen del modelo directo en un 59 %.

Esta diferencia se debe a la forma de determinar la rigidez del suelo en ambos modelos, ya que el modelo indirecto usa el coeficiente de balasto en función de la clasificación del suelo. También influye significativamente la manera de concebirse la simulación de la interacción suelo-estructura en los modelos indirectos que emplean la teoría de Winkler, determinando un valor único de rigidez para la interacción suelo-losa, así como resortes aislados en la longitud del pilote y en su punta para establecer la interacción pilote suelo. En el modelo directo el suelo se modela como un continuo, se utilizan ecuaciones constitutivas de los materiales que representan de forma más real el comportamiento de los materiales y se incluye la interfaz que evalúa a través de una ley de fricción la interacción suelo-pilotes y losa-suelo de soporte.

3.5. CARGA AXIAL EN LOS PILOTES

La distribución de la carga que toma cada pilote es fundamental cuando se analiza la interacción suelo-estructura de cimentación, en una solución de losa combinada con pilotes. El diseño geotécnico y estructural de estos elementos presupone garantizar cuál es el valor de carga que recibe cada pilote ubicado bajo la losa de cimentación de manera que no se sobrepase su capacidad de carga admisible. Luego se determina el valor de carga axial máxima que llega al pilote para la combinación que no incluye al viento (G+Q), los resultados se muestran en la figura 11.

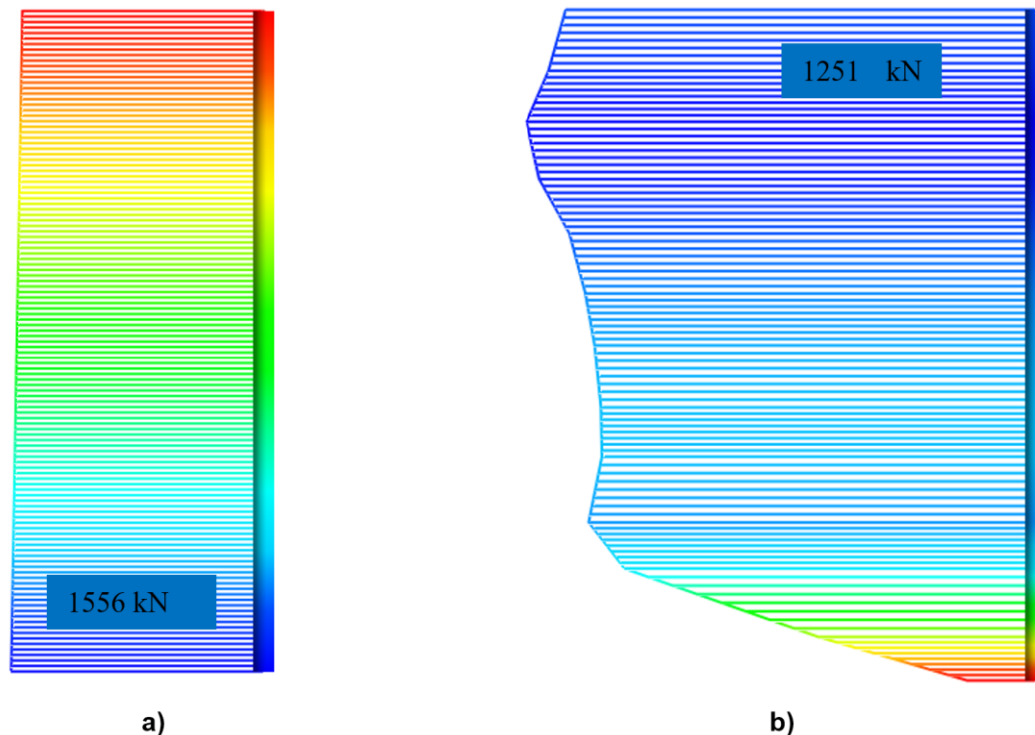


Fig. 11- Carga axial en pilote central a) Modelo indirecto b) Modelo directo.

En el modelo indirecto se obtiene un mayor valor de carga axial que en el modelo directo, al considerar en este último, el efecto de la fricción pilote-suelo con mayor precisión al utilizar una interfaz, y el aporte de la punta del pilote se considera en función de los desplazamientos que producen las cargas externas.

En el modelo directo, se simula el trabajo conjunto de los elementos del sistema de cimentación y el aporte de los elementos de soportes vertical y horizontal de la superestructura, en función de sus rigideces. Determinadas a partir de los parámetros deformacionales de los materiales, las cargas actuantes y las características geométricas de cada elemento. Para el modelo indirecto la carga axial se mantiene constante a lo largo del pilote al no considerarse la variación de la rigidez del suelo con la profundidad y el poco rigor con el que se evalúa el aporte de la carga resistente por fricción.

4. CONCLUSIONES

La interacción suelo-estructura permite evaluar el comportamiento de soluciones de cimentación compuestas por varios elementos, considerando el trabajo conjunto de estos, que presentan un comportamiento tridimensional complejo. Se concluye que el empleo de modelos indirectos de interacción suelo-estructura, no permite considerar todos los efectos de interacción que tienen lugar entre los elementos del sistema de cimentación y no emplea ecuaciones constitutivas que representen rigurosamente el comportamiento de los materiales. Los resultados alcanzados en la investigación muestran que al tener en cuenta este efecto, las fuerzas interiores axial y cortante en la columna de esquina analizada aumenta su valor en un 20 y un 48 % respectivamente, mientras que en la columna intermedia varía entre 15 y 39 % con relación al resultado alcanzado con el modelo empotrado. Considerando la variación de los resultados que ocurre en los elementos seleccionados, así como la distribución no uniforme en planta de estos elementos, se recomienda que este análisis se realizase para todas las columnas. Por otro lado, existen diferencias significativas entre los valores de los desplazamientos horizontales y asentamientos que se obtienen cuando se modela el efecto de interacción suelo-estructura, demostrándose que cuando se emplea el método indirecto llegan a duplicar estos valores con respecto al modelo directo. Por último, la distribución de la carga que llega a cada pilote presenta diferencias según el modelo que se emplee para simular el efecto de interacción, siendo tratado este con mayor rigor en el modelo directo. De manera general se tiene que el modelo directo simula el comportamiento del suelo de una forma más acercada a la realidad que el método indirecto ya que tiene en cuenta el trabajo conjunto de todos los elementos que conforman la cimentación.

1. A. Fernández Limés, W. D. Cobelo Cristiá, and I. Fernández Lorenzo, "Influence of static soil-structure interaction at 100-meter high buildings," *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 41, no. 2, p. 1, 2023. <https://doi.org/10.14482/inde.41.02.201.456>
2. F. Cavalieri, A. A. Correia, H. Crowley, and R. Pinho, "Dynamic soil-structure interaction models for fragility characterisation of buildings with shallow foundations," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 132, p. 106004, 2020/05/01/ 2020. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026772611930911X> <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.106004>
3. D. Boada-Fernández, F. Calderín-Mestre, and D. Almenarez-Labañino, "Consideración del fenómeno interacción suelo-estructura en edificio prefabricado," *Ciencia en su PC*, vol. 1, no. 4, pp. 79-94, 2020. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181366194007>
4. B. Shirkhanghah and H. E. Kalehsar, "The effect of soil-structure interaction on the along-wind response of high-rise buildings," in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 2022, vol. 175, no. 4, pp. 332-346. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181366194007>
5. Y. Almaguer Miranda and W. Cobelo Cristiá, "COMPARACIÓN DEL MÉTODO DISCRETO Y EL MÉTODO CONTÍNUO PARA OBTENCIÓN DE LOS DEPLAZAMIENTOS VERTICALES Y HORIZONTALES EN PILOTES, APLICANDO LA INTERACCION DINÁMICA SUELO ESTRUCTURA," *Revista Ciencia y Construcción*, vol. 4, no. 4, pp. 88-101, 12/30 2023. Available: <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/217>
6. S. Saini and E. T. Goyal, "Analysis of piled raft foundation using MIDAS GTS NX," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 6, pp. 5491-5499, 2019. <https://irjet.net/archives/V6/i5/IRJET-V6I5718.pdf>
7. Q. Cao and Y. Hang, "Settlement simulation of soft clay in the subway under dynamic load based on Midas GTS NX," in *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 237, p. 03011: EDP Sciences. Available: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2021/13/e3sconf_arfee2021_03011/e3sconf_arfee2021_03011.html
8. NC-284. Cargas de uso. Edificaciones, 2003. Available: https://www.nconline.disaic.cu/index.php?page=m_search_norms.public.search_norms&Block=Cat%E1logo
9. NC-283. Densidad de materiales naturales, artificiales y de elementos de construcción como carga de diseño, 2003. Available: https://www.nconline.disaic.cu/index.php?page=m_search_norms.public.search_norms&Block=Cat%E1logo
10. J. A. J. Salas, *Geotecnia y cimientos III*. 1980, pp. 954-955. Available: https://www.google.com.cu/books/edition/Geotecnia_y_Cimientos_lII/7oCoPgAACAAJ?hl=es
11. J. M and R. Ortiz, "Curso aplicado de cimentaciones," ed. Ed. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, Madrid, 1982, p. 266. Available: https://www.casadellibro.com/libro-curso-aplicado-cimentaciones/2910005927418/589105?srsId=AfmBOpaMJxu5QYMmXOuWxL_p5kjX5WZ4wmBqkoRLOpe6sC_OE4fKGWGg
12. A. B. Vesic, "Beams on elastic subgrade and the Winkler's hypothesis," in *Proceedings of 5th International Conferences on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1961, vol. 1, pp. 845-850. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573105974313128832>
13. NC-46. Construcciones sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción, 1999. Available: https://www.nconline.disaic.cu/index.php?page=m_search_norms.public.search_norms&Block=Cat%E1logo