Influencia De La Interacción Dinámica Suelo Estructura En El Desempeño Y El Mecanismo De Colapso De Una Edificación De Tipología Mixta Bajo Carga Sísmica

Influence Of The Soil – Structure Interaction On The Performance And Failure Mechanism Of A Dual System Building Under Seismic Load.

Autores

José Alejandro Sariol Pérez[1], Nelson Fundora Sautié[2], Janet Otmara Martínez Cid[3]

[1] Ingeniero Civil, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), Calle 114 % Rotonda y Ciclovía, josealesarper@civil.cujae.edu.cu
[2] Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), Calle 114 % Rotonda y Ciclovía, nelsonfs@civil.cujae.edu.cu
[3] Ingeniera Civil, Doctora en Ciencias, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), Calle 114 % Rotonda y Ciclovía, jcid@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

En zonas de alto riesgo sísmico se espera que las estructuras ingresen en el rango de comportamiento inelástico con la garantía de que se logre una adecuada disipación de energía. Para ello se recomienda, entre otros aspectos, que se defina en estructuras formadas por pórticos, una relación de rigidez entre vigas y columnas tal que se permita el desarrollo del requisito de columna fuerte-viga débil, parámetro a revisar cuando se incluye en el análisis la interacción dinámica suelo estructura (IDSE). Lo anterior puede conducir a una modificación importante del mecanismo de colapso, así como del desempeño de la edificación.

En la presente investigación se analiza la influencia de la IDSE en el mecanismo de colapso y el nivel de desempeño que desarrolla una edificación de 8 niveles formada por tipología mixta de hormigón armado, ubicadas en Santiago de Cuba. Para los modelos de análisis se tiene en cuenta la IDSE mediante las formulaciones de A.E. Sargsian. Se aplica el método estático no lineal (Pushover) mediante el software ETABS v18. Se considera la estructura apoyada sobre suelo D según define la norma cubana NC 46:2017. Se concluye que la incorporación de la IDSE influye significativamente en el mecanismo de colapso y el nivel de desempeño.

Palabras claves: *interacción dinámica suelo – estructura, mecanismo de colapso, nivel de desempeño, pushover.*

ABSTRACT

In high seismic hazard zones, the structures are expected to enter the inelastic range, ensuring that adequate energy dissipation can be achieved. For this, it is recommended, among other aspects, to define a beam-to-column stiffness ratio for framed structures that allows achieving the strong column-weak beam criteria. This parameter is analyzed based on the building's height when the dynamic soil-structure interaction (DSSI) is included on the model. The aforementioned elements could significantly change the collapse mechanism and performance building as well.

This research analyzes how DSSI influences the collapse mechanism and performance level of eight-story structure with dual frame-wall RC systems, located in Santiago de Cuba municipality. The dynamic soil-structure interaction was taken into consideration for the analysis models, through A.E. Sargsian formulas. For this, the nonlinear static analysis (Pushover) with ETABS v18 software was used. Structures resting on soil type D were studied, as defined by Cuban standard NC 46:2017. It was concluded that the use of DSSI has a significant influence on the collapse mechanism and level of building performance.

Key words: *collapse mechanism, dynamic soil-structure interaction, performance level, pushover.*

Nota Editorial: Recibido: Marzo 2022 Aceptado: Marzo 2022

1. Introducción

A raíz de varias investigaciones tanto a nivel nacional como internacional [1-5], ha quedado demostrado la necesidad de la consideración de la interacción dinámica suelo - estructura (IDSE) para el análisis sísmico de estructuras. Arturo Tena da una amplia demostración de ello en su investigación [4], específicamente para suelos blandos. Los avances tecnológicos actuales y la materialización de disposiciones y recomendaciones al respecto en las normativas a nivel mundial, hacen que sea relativamente sencillo tener en cuenta este fenómeno a la hora de analizar una estructura. Los cambios producidos en el comportamiento de las edificaciones, ante acciones de origen sísmico, debido a la implementación de la IDSE, pueden arrojar valores críticos de respuesta para el posterior diseño estructural.

Sistemas estructurales con una alta capacidad disipativa son deseables en zonas sísmicas donde se espera que las estructuras ingresen en el rango de comportamiento inelástico. Algunas investigaciones así lo demuestran [6]. Para garantizar que se desarrolle un comportamiento dúctil es necesario realizar un detallado de la sección para protegerla ante otros tipos de fallos prematuros, como por ejemplo el fallo a cortante. Más allá de diseñar secciones donde se desarrollen rótulas plásticas con una alta capacidad deformacional, es necesario que estas se formen en los lugares adecuados. La aparición de rótulas plásticas en las columnas, antes que en las vigas, puede conducir a un fallo por mecanismo de piso sin que la estructura llegue a desarrollar toda su capacidad disipativa. Para evitar este tipo de fallos y garantizar un comportamiento estructural dúctil, normativas actuales [7-9] establecen relaciones mínimas entre la resistencia de las columnas y las vigas, adoptando el principio de columna fuerte – viga débil. Algunos autores han concluido que el mecanismo de colapso que desarrollan las estructuras varía de manera negativa con la consideración de la IDSE [3, 10].

Existe una tendencia actual al diseño por desempeño de estructuras ante acciones sísmicas. Algunas normativas definen niveles de desempeño máximos según la importancia de la obra y el tipo de sismo considerado en el diseño [7, 11]. Siguiendo esta línea en la presente investigación se desarrolla un análisis estático no lineal (Pushover) de una edificación de 8 niveles de hormigón armado con tipología mixta de tímpanos y pórticos. Se incorpora la IDSE con el modelo de rigideces equivalentes del suelo de A.E. Sargsian considerando las edificaciones apoyadas sobre un suelo tipo D según define la norma cubana [7].

2. Desarrollo

La edificación objeto de análisis, destinada a viviendas, se encuentra emplazada en la cabecera provincial de Santiago de Cuba, una de las zonas de mayor sismicidad del país. Posee 8 niveles donde el primero es de 3m de altura y los restantes de 2,7m de puntal, para una altura total de 21,9m. Está conformada por plantas cuadradas con módulos de 7,20m x 7,20m, con un sistema de soporte a base de pórticos y tímpanos distribuidos uniformemente. Por todas estas características la edificación no posee irregularidades en planta ni en elevación.

2.1. Modelación de la estructura

Se modelan dos estructuras: una considerada unida rígidamente al suelo y la otra apoyada sobre una losa de cimentación con resortes que simulan el suelo para incorporar la IDSE. Se realiza el análisis estático no lineal a los modelos de la edificación con el software ETABS en su versión 18.

Se determinarán, para cada modelo, los periodos de oscilación, los cortantes basales, las fuerzas sísmicas por piso, los desplazamientos en el tope de la edificación, las derivas de piso, el punto y nivel de desempeño y el orden y lugar de aparición de las rótulas plásticas en vigas y columnas.

2.1.1. Geometría de los elementos

Las losas de entrepiso y cubierta poseen un espesor de 20cm y son consideradas diafragmas rígidos. El modelo con IDSE posee una losa de cimentación cuadrada de 33,3m de lado y 1m de espesor.

Las columnas poseen una sección transversal de 65x65 centímetros y las vigas de 40x60 cm, cubriendo luces de 7,2m en la gran mayoría de los casos excepto para las consecutivas a cada lado de los tímpanos.

Los tímpanos poseen un espesor de 30 cm y son continuos en todos los niveles de la edificación. Los exteriores son de 8m de longitud, mientras que los del núcleo son de 4m. Se utilizan las rigideces reducidas de las secciones de los elementos. Los valores asumidos se resumen en la tabla 1. Las siglas I_g representan la inercia de la sección bruta de los elementos. En la figura 1 se muestra una vista tridimensional de la edificación y la vista en planta.

Tabla 1: *Rigideces equivalentes de los elementos.*

Elemento	Rigidez efectiva
Columnas	$0{,}7I_g$
Vigas	$0{,}35I_g$
Muros	$0{,}7I_g$
Losas	$0{,}25I_g$

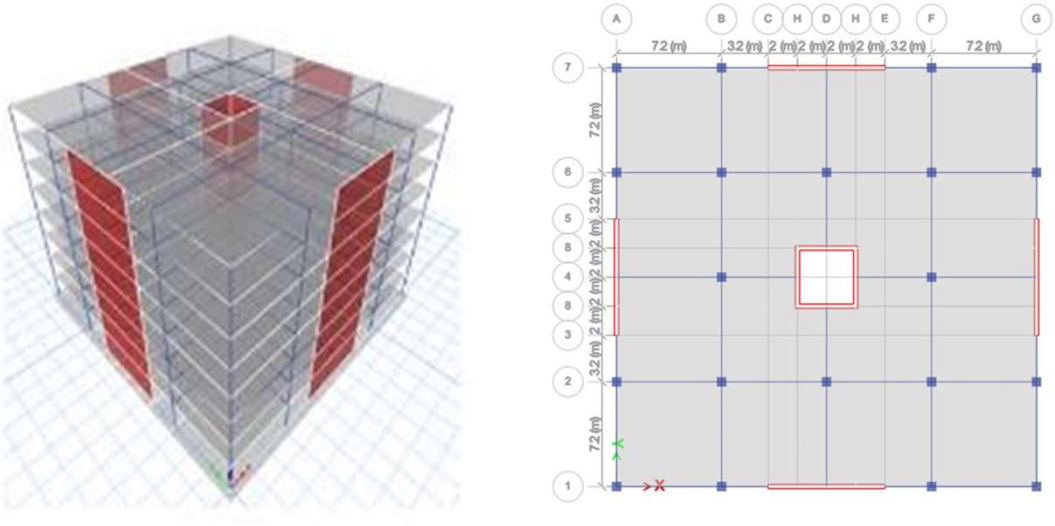

Figura 1: *Modelo tridimensional y planta de la edificación. (Elaboración propia).*

2.1.2. Materiales empleados

Todos los elementos son de hormigón armado "in-situ". La resistencia característica a los 28 días es $f_c' = 35\ MPa$, con un peso específico de $24\ kN/m^3$, un módulo de elasticidad secante $E = 4700\sqrt{f_c'} = 27805\ MPa$ y un coeficiente de Poisson $\nu = 0{,}17$.

El acero de refuerzo empleado posee una resistencia de fluencia $f_y = 300\ MPa$ y un módulo de elasticidad $E = 2 * 10^5\ MPa$.

2.1.3. Condiciones de Borde

Las losas son continuas sobre vigas en sus cuatro bordes. Las uniones columna-columna y viga-columna son consideradas continuas. Se modelan las balsas de cimentación, para una variante, apoyadas elásticamente sobre resortes con una rigidez acordes al suelo y la cimentación utilizada. En la otra variante las estructuras son empotradas.

2.1.4. Cargas actuantes

2.1.4.1. Cargas permanentes

En la norma cubana se recogen las densidades de los materiales para la determinación de las cargas sobre la estructura. Para los entrepisos se consideran 10cm de relleno en el piso y 5cm de losas cerámicas y mortero para la terminación. Además, se considera que se coloca tabiquería ligera. Para la cubierta se asume igualmente un espesor promedio del relleno de 10cm y que la solución de impermeabilización fue con tres capas de papel asfáltico. En la tabla 2 se resumen los valores de las cargas.

Tabla 2: *Cargas permanentes en la edificación*

Material	Peso específico	Carga G (kN/m^2)	
		Entrepiso	Cubierta
Relleno	0,18 kN/m^2/cm	1,8 (10cm)	1,8 (10cm)
Losas cerámicas	0,2 kN/m^2/cm	1 (5cm)	-
Tabiquería ligera	0,5 kN/m^2	0,5	-
Impermeabilización (3 capas de papel asfáltico)	0,07 kN/m^2	-	0,07
	Total	3,3	1,87

2.1.4.2. Carga de uso

Las cargas vivas fueron extraídas de la norma cubana. La edificación se considera para uso de viviendas por lo tanto en los entrepisos se utiliza la carga correspondiente para estos casos. La cubierta se considera con desagüe por tragante y no accesible al público. En la tabla 3 se recogen los valores de carga.

Tabla 3: *Cargas de uso en la edificación*

	Carga Q (kN/m^2)
Entrepiso	1,5
Cubierta	2

2.1.4.3. Carga sísmica

Como se mencionó las edificaciones se consideran emplazadas en el municipio Santiago de Cuba que clasifica como zona 5, de peligro sísmico muy alto, según la norma cubana [7]. El cálculo de la carga sísmica se realiza mediante el Método Estático Equivalente (MEE). Los procedimientos para determinación de esta carga son similares tanto para base empotrada como para cuando se considera IDSE. Para la región de emplazamiento se definen los parámetros iniciales en la tabla 4.

Tabla 4: *Parámetros iniciales para la zona de emplazamiento*

	$S_0\ (g)$	$S_s\ (g)$	$S_1\ (g)$	$T_L\ (s)$	Zona
Santiago de Cuba	0,513	1,035	0,428	6	5

Se consideró el sismo de diseño como básico u ordinario y la edificación se clasifica como obra ordinaria con categoría ocupacional tipo II, por lo que posee un nivel de protección sísmica D (NPS-D) según la norma cubana [7].

- **Ajuste por clase de sitio e intensidades sísmicas especiales**

Se utilizan las expresiones (1) y (2), los valores de los coeficientes y las ordenadas espectrales ajustadas se recogen en la tabla 5.

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

$$S_{1s} = S_1 * F_v * N_v \quad (2)$$

Donde

S_s y S_1 – ordenadas espectrales para periodo corto y largo respectivamente del sismo extremo considerado.

F_a y F_v – coeficientes de sitio para periodos de vibración cortos y largos respectivamente.

N_a y N_v – coeficientes por intensidades especiales para periodos de vibración cortos y largos respectivamente.

S_{CS} y S_{1s} – son las ordenadas espectrales para periodos cortos y largos respectivamente, ajustadas por las características del sitio de emplazamiento.

Tabla 5: *Coeficientes de corrección y ordenadas espectrales ajustadas*

Suelo	F_a	F_v	N_a	N_v	$S_{CS}\ (g)$	$S_{1s}\ (g)$
D	1	1,608	1	1	1,035	0,688

- **Construcción del espectro de diseño**

Para el sismo de diseño el factor de escala $K_d = 0{,}66$ obteniéndose los valores de aceleraciones espectrales para periodo corto (S_{DS}) y largo (S_{D1}) según las expresiones (3) y (4).

$$S_{DS} = S_{CS} * K_d = 0{,}683\ g \qquad S_{DS} = S_{CS} * K_d = 0{,}683\ g \tag{3}$$

$$S_{D1} = S_{1s} * K_d = 0{,}688\ g \qquad S_{D1} = S_{1s} * K_d = 0{,}688\ g \tag{4}$$

Los periodos de esquina T_0 y T_s expresados en segundos son calculados por las expresiones (5) y (6) donde T_L es el periodo de transición del periodo largo.

$$T_0 = 0{,}2 * \frac{S_{D1}}{S_{DS}} = 0{,}133\ s \qquad T_0 = 0{,}2 * \frac{S_{D1}}{S_{DS}} = 0{,}133\ s \tag{5}$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} = 5 * T_0 = 0{,}665\ s \qquad T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} = 5 * T_0 = 0{,}665\ s \tag{6}$$

El periodo natural de oscilación de la estructura es determinado en el software ETABS obteniéndose un valor $T = 0{,}494\ s$ para la estructura considerada empotrada y $T = 0{,}566\ s$ en el modelo con IDSE incorporada. En ambos casos resulta menor que el límite empírico ($1{,}4 * T_a = 0{,}694$) establecido por la norma cubana [7].

Las ordenadas espectrales (S_a) para la formación del espectro de diseño (figura 2) se determinan según las expresiones de la (7) a la (10).

$$S_a(T) = S_{DS}\left(0{,}4 + 0{,}6\frac{T}{T_0}\right) \qquad para\ \ T \leq 0{,}133\ s \tag{7}$$

$$S_a(T) = S_{DS} \qquad para\ \ 0{,}133\ s \leq T \leq 0{,}665\ s \tag{8}$$

$$S_a(T) = \frac{S_{D1}}{T} \qquad para\ \ 0{,}665\ s \leq T \leq 6\ s \tag{9}$$

$$S_a(T) = \frac{S_{D1} * T_L}{T^2} \qquad para\ \ T > 6\ s \tag{10}$$

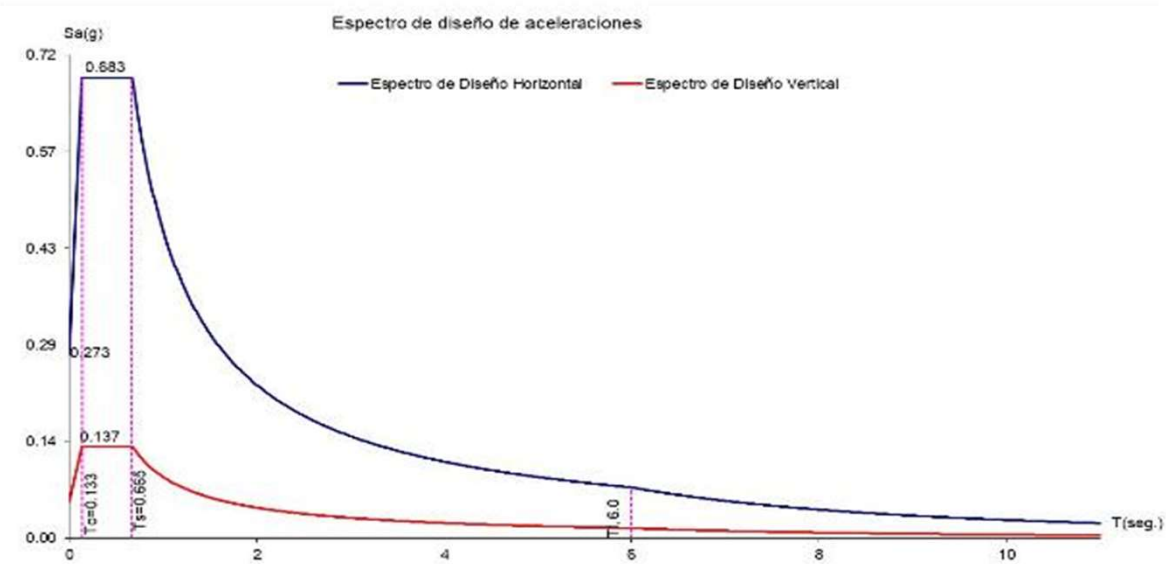

Figura 2: *Espectro de demanda del sismo de diseño*

La tabla 6 muestra los valores de aceleraciones espectrales obtenidas para ambas condiciones de apoyo.

Tabla 6: *Ordenadas espectrales*

Condición de apoyo	Periodo fundamental $T(s)$	Ordenada espectral $S_a(g)$
Empotrado	0,494	0,683
IDSE	0,566	0,683

- **Características del sistema estructural**

La edificación estudiada se puede clasificar, según los establecido en la norma cubana [7], como un sistema estructural E3 pues está conformado por diafragmas horizontales rígidos sostenidos verticalmente por la combinación de pórticos y muros de cortante de hormigón reforzado. Según la norma cubana [7] para este sistema estructural con muros de hormigón armado tipo A se establecen los coeficientes de diseño que se recogen en la tabla 7.

Tabla 7: *Coeficientes de diseño para el sistema estructural utilizado*

Factor genérico de reducción de la respuesta sísmica **R**	5
Factor de amplificación de desplazamientos post-elásticos $\boldsymbol{\Omega_r}$	5

- Obtención de la carga

Mediante el MEE descrito en la norma cubana [7] se obtienen los valores de cortante basal y fuerza por piso que se recogen en la tabla 8.

Tabla 8: *Cortante basal y fuerza sísmica por piso*

Nivel	Empotrado		IDSE	
	$V_{b_{x,y}}\ (kN)$	$F_{x,y}\ (kN)$	$V_{b_{x,y}}\ (kN)$	$F_{x,y}\ (kN)$
8	10461	2026,29	10461	2056,12
7		2080,01		2101,49
6		1787,50		1796,96
5		1495,00		1494,07
4		1202,50		1193,15
3		910,00		894,66
2		617,50		599,37
1		342,32		325,31

2.2. Combinaciones de cargas

En el análisis y diseño de las edificaciones se utilizan las combinaciones de carga recogidas en las normativas cubanas.

- $1{,}4G$
- $1{,}2G + 1.6Q + 0{,}5Q_c$
- $1{,}2G + 1.6Q_c + 0{,}5Q$
- $1{,}2G + Q_t + S_v \pm S_{hx}$
- $G + Q_t - S_v \pm S_{hx}$

Donde:

G – Carga permanente
Q – Carga de uso de entrepiso
Q_c – Carga de uso de cubierta
Q_t – Carga de uso total
S_v – Componente vertical del sismo

La norma cubana [7] establece que la componente vertical del sismo (S_v) se tome en cuenta como una porción de la carga permanente, aumentando o disminuyendo su valor según establezca la combinación correspondiente. La expresión (11) establece la fracción que representa S_v de la carga permanente.

$$S_v = 0.2S_{DS} * G = 0.137 * G \quad (11)$$

2.3. Implementación de la ISDE

Para la incorporación de la interacción dinámica suelo-estructura se calculan los valores de rigideces equivalentes del suelo de apoyo según las expresiones de A.E. Sargsian recogidas en [1]. Se determinan los seis valores para igual número de grados de libertad de la balsa de cimentación. La tabla 9 resume los valores de las rigideces.

Tabla 9: *Rigideces equivalentes del suelo en los resortes*

Suelo	Rigideces equivalentes del suelo			
	$K_x = K_y\ (kN/m)$	$K_z\ (kN/m)$	$K_{\varphi x} = K_{\varphi y}\ (kNm)$	$K_{\psi z}\ (kNm)$
D	946797	864140	140821104	148566850

Donde:

$K_x\ y\ K_y$ – coeficientes de rigidez de desplazamiento elástico uniforme

K_z – coeficiente de rigidez de compresión elástica

$K_{\varphi x}\ y\ K_{\varphi y}$ – coeficientes de rigidez de compresión elástica no uniforme

$K_{\psi z}$ – coeficiente de rigidez de desplazamiento elástico no uniforme

2.4. Diseño estructural

Para poder evaluar el desempeño de la edificación y el mecanismo de colapso que desarrollaría ante la ocurrencia del sismo de diseño que se tuvo en cuenta en la presente investigación, es necesario contar con un diseño previo del refuerzo de las secciones. Para cumplir con el requisito de columna fuerte-viga débil recogido en las normas [8, 12] se debe cumplir la condición (12).

$$\sum M_{nc} \geq 1{,}2 \sum M_{nv} \quad (12)$$

Donde:

M_{nc} – sumatoria de las resistencias a flexión de las columnas que convergen a un nudo medidas en la cara del nudo.

M_{nv} – sumatoria de las resistencias a flexión de las vigas que convergen a un nudo medidas en la cara del nudo.

Las relaciones de momentos resistentes de vigas y columnas $\sum M_{nc} / \sum M_{nv}$ se muestran en la tabla 10. Como se aprecia cumple con el requisito establecido en la norma cubana [12] de que la relación sea 1,2 o superior.

Tabla 10: *Relación de Resistencia a momento entre vigas y columnas*

$M_{nc}\ (kNm)$	$M_{nv}\ (kNm)$	$\sum M_{nc} / \sum M_{nv}$
565	433	1,3

3. Resultados

3.1. Períodos de oscilación

Con la inclusión de la IDSE se consideran los movimientos de la base, lo que produce un incremento del periodo de oscilación de la estructura. La figura 3 muestra los valores obtenidos al tener en cuenta el efecto de la IDSE a través de las formulaciones de A.E. Sargsian, con lo que sufre un aumento del 14.57% del valor obtenido para el modelo considerado empotrado.

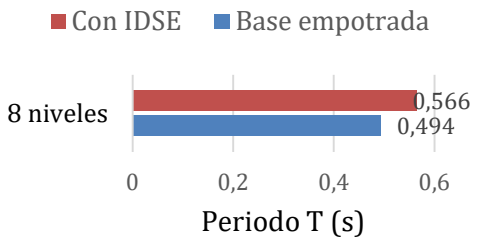

Figura 3: *Variación del periodo de la estructura*

Otro aspecto importante a evaluar es la relación entre el periodo de oscilación de la estructura y el predominante de las vibraciones del suelo. La figura 4 refleja este aspecto. En la misma se aprecia que con la inclusión de la IDSE la relación R_t se acerca a la unidad, por lo que se puede desarrollar un comportamiento desfavorable en esta estructura.

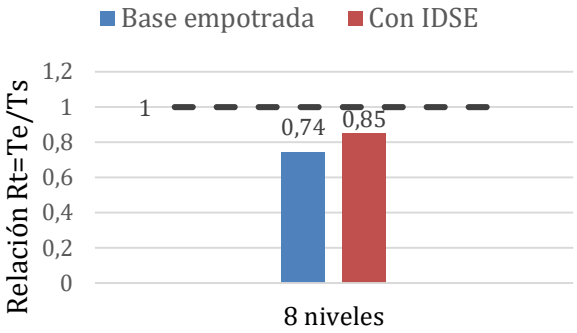

Figura 4: *Relaciones entre los periodos de la estructura y el suelo*

3.2. Desplazamientos y derivas de piso

En el caso de la carga sísmica, el hecho de que se desarrollen desplazamientos excesivos en la edificación puede generar graves problemas en la respuesta estructural pues estos están asociados a la rigidez y permite comprobar el grado de ductilidad de la edificación. La diferencia entre el movimiento de un piso y otro genera grandes esfuerzos en los elementos de soporte vertical como columnas y muros. La tabla 11 muestra el valor admisible de desplazamiento en el tope $H/600$ para la edificación.

Tabla 11*: Desplazamientos admisibles en el tope*

Altura (m)	Desplazamiento admisible (mm)
21,9	36,5

En la figura 5 se muestra la gráfica de desplazamiento por pisos de la edificación, obtenidos para la combinación $G + Q + S_v + Sh_x$.

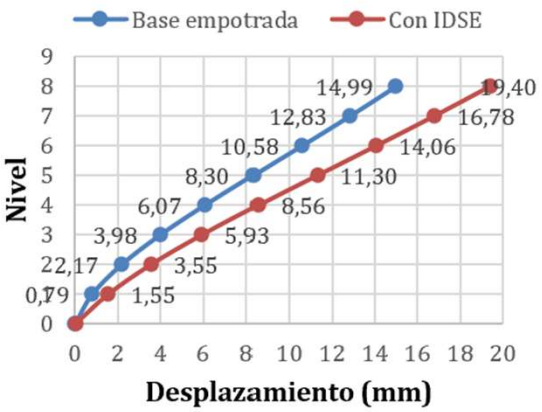

Figura 5: *Desplazamiento por piso*

En el caso del desplazamiento en el tope, se demuestra que la edificación cumple con el desplazamiento máximo admitido para zonas sísmicas. Se observa, además, que con la inclusión de la IDSE estos desplazamientos aumentan, resultado esperado a partir de trabajos consultados [2, 3, 13]. Esto se debe a que al considerar la flexibilidad de la base se genera un desplazamiento por la rotación de la cimentación sumado al propio desplazamiento elástico de la estructura. En la figura 6 se muestran los porcentajes de variación del desplazamiento para cada nivel. Se observa que la mayor diferencia al incluir la IDSE se da en el primer nivel y va disminuyendo con la altura de la edificación.

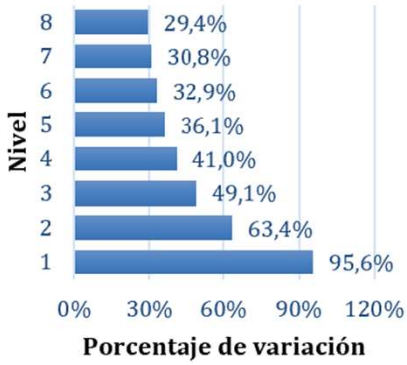

Figura 6: *Porcentaje de variación de los desplazamientos por piso.*

Las derivas de piso son una medida de la respuesta estructural de un sistema sometido a cargas laterales y permite estimar el grado de daño que pueden sufrir tanto los elementos estructurales como los no estructurales. La figura 7 muestra los resultados de las derivas de piso, obtenidas igualmente para la combinación $G + Q + S_v + Sh_x$. Se aprecia un comportamiento similar que para el desplazamiento. Con la inclusión de la IDSE el porcentaje de deriva por piso es superior (Figura 8). Según la norma cubana [7] la deriva admisible para edificaciones en general, con clasificación de ordinaria, es de 2% de la altura del piso en que se analiza. En los resultados que ofrece el programa ETABS, los valores de deriva contienen el término “altura del piso” (hp) por lo que la comparación se realiza solo con el término 0,020 o en términos porcentuales 2%.

Los gráficos están acordes a la tendencia del comportamiento de edificaciones con tipología mixta en las que la mayor deriva debe estar en los pisos inferiores dado el trabajo conjunto pórtico-tímpano. En ningún caso se supera el valor de deriva permisible. Para las relaciones de incremento que se produce para la deriva, se observa igualmente una mayor diferencia en los niveles inferiores.

En ambos casos se aprecia un mayor efecto de la incorporación de la IDSE en la parte baja de la estructura. Estos resultados son similares a los obtenidos por F. Behnamfar en su investigación [14].

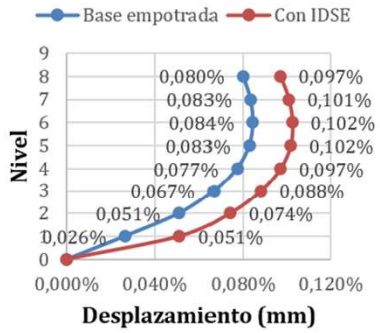

Figura 7: *Derivas de piso.*

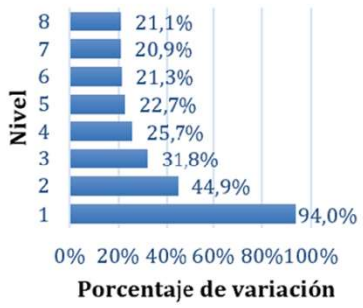

Figura 8: *Porcentaje y variación de las derivas*

3.3. Cortante basal y fuerzas sísmicas por piso

La fuerza que ejerce el sismo es un parámetro que se ha demostrado sufre variaciones con la incorporación de la IDSE. En la figura 9 se muestran los resultados obtenidos en la presente investigación respecto al cortante basal.

Para la estructura no varía el cortante basal con la inclusión de la IDSE. Lo anterior es debido a que para los periodos de oscilación obtenidos y presentados en la tabla 4, el valor de aceleración espectral es constante al estar ubicado en la zona de la meseta del espectro de demanda definido según la norma cubana [7]. Sin importar la condición de apoyo, iguales valores de aceleración espectral generan coeficientes sísmicos (C_s) de igual magnitud y cortantes basales idénticos.

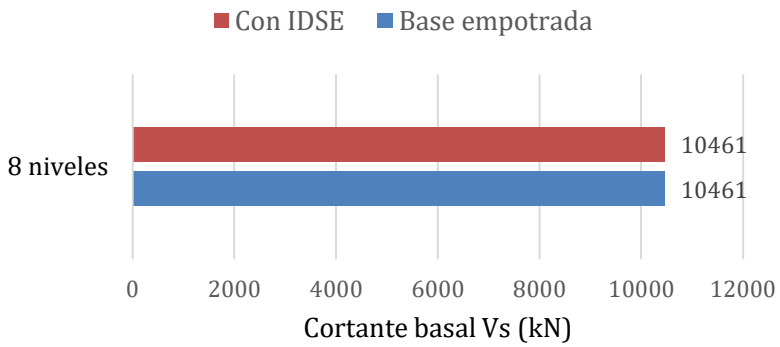

Figura 9: *Cortante basal en la estructura según las condiciones de apoyo.*

La figura 10 muestra que la edificación sufre cambios con la incorporación de la interacción al modelo de análisis en los valores de fuerzas sísmicas por piso. En la gráfica los valores negativos indican que se ha producido una disminución de la fuerza sísmica obtenida para los modelos con IDSE respecto a la que se calcula para las estructuras empotradas; los valores positivos indican el efecto contrario. Para la estructura, el comportamiento de la variación de la carga inercial en cada nivel es irregular, generándose una disminución del nivel 1 al 5 y un aumento del 6 al 8. Esto se debe a que en esta estructura la fuerza sísmica depende exclusivamente del valor del coeficiente de distribución del cortante basal en la altura (C_v), el cual presenta una variación igualmente irregular.

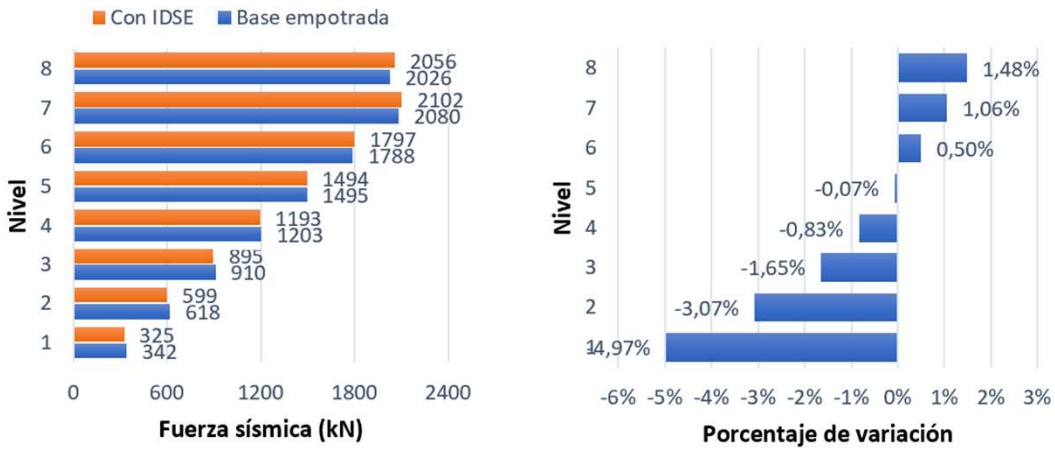

Figura 10: *Fuerza sísmica por piso y porcentaje de variación.*

3.4. Curva de capacidad

En la figura 11 se muestran las curvas de capacidad obtenidas con el software ETABS v18. Se aprecia que, para cortantes basales similares, se producen mayores desplazamientos en el tope de la edificación con la inclusión de la IDSE, lo que evidencia una reducción de la rigidez de la estructura, reflejada en la menor pendiente en las curvas.

Otro aspecto a analizar es el punto de fluencia efectiva definido por el cortante basal y el desplazamiento que representan el cambio de comportamiento elástico a inelástico de la estructura, el cual es obtenido mediante la bilinearización de la curva de capacidad. La tabla 12 recoge estos valores. En la misma se evidencia que el valor de cortante basal de fluencia de la estructura con IDSE disminuye con relación al valor de este parámetro al considerar la base empotrada. Esta diferencia puede responder a que la fluencia efectiva de la estructura empotrada depende fundamentalmente de la fluencia de las vigas que incursionan en el rango inelástico, mientras que al incluir el efecto de la IDSE la pérdida de rigidez pasa a estar regida por la fluencia de las columnas de planta baja. Asimismo, el desplazamiento de fluencia aumenta con la inclusión de la IDSE, generando una curva de menor pendiente, lo cual evidencia una pérdida de rigidez en la estructura que conlleva a una reducción de la resistencia.

Tabla 12: *Coordenadas de los puntos de fluencia efectiva en la curva de capacidad.*

Condición de apoyo	$V_y\ (kN)$	$D_y\ (mm)$
Empotrado	39925	50
IDSE	39347	64

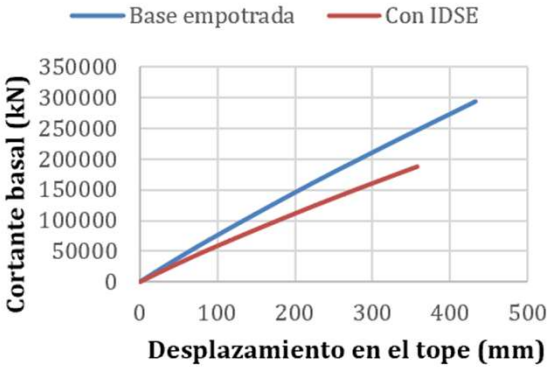

Figura11: *Curvas de capacidad de las estructuras.*

3.5. Punto y nivel de desempeño

En la figura 12 se muestran los puntos de desempeño obtenidos según la condición de apoyo considerada. En la figura se aprecia como el punto de desempeño cambia con la inclusión de la IDSE, desplazándose hacia la derecha del espectro. Esto significa que la estructura ingresa más en el rango de comportamiento plástico y por ende se desarrollará un desempeño más deficiente. La tabla 13 muestra las coordenadas de los puntos de desempeño, tanto en el espectro como en la curva de capacidad

Tabla 13: *Coordenadas de los puntos de desempeño en la curva y espectro de demanda.*

Condición de apoyo	Espectro de capacidad		Curva de capacidad	
	$S_d\ (mm)$	$S_a\ (g)$	$D\ (mm)$	$V_b (kN)$
Empotrado	119,9	1,731	203,7	147877
IDSE	158	1,583	273,7	147614

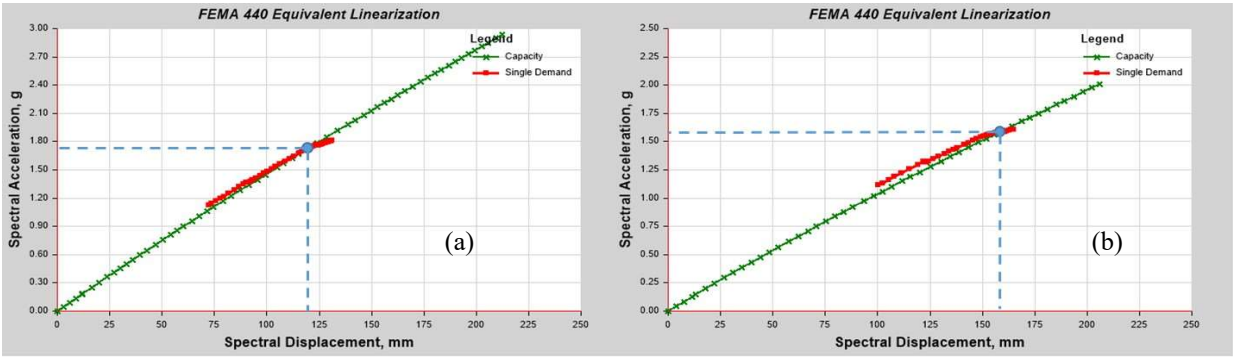

Figura 12: *Puntos de desempeño en la estructura de 8 niveles: (a) Base empotrada, (b) IDSE.*

Para la obtención del nivel de desempeño es necesario sectorizar la curva de capacidad. Esta se desarrolla a partir de la ubicación del punto de fluencia efectiva que se recoge en la Tabla 12. Este punto representa el cambio de comportamiento elástico a inelástico de las estructuras. En la tabla 14 se definen los niveles de desempeño alcanzados según se establecen en la normativa [7].

Tabla 14: *Niveles de desempeño alcanzados.*

Condición de apoyo	NC 46: 2017
Empotrado	Seguridad de vida
IDSE	Prevención de colapso

En la edificación se modifica el desempeño al incluir la IDSE. La norma cubana [7] establece que estructuras ordinarias bajo la acción de un sismo igualmente ordinario deben presentar un nivel de desempeño operativo o menor. La edificación no cumple con este para ninguna de las condiciones de apoyo analizadas.

3.6. Formación de las rótulas plásticas. Mecanismo de colapso.

La configuración y orden de aparición de las rótulas plásticas que genera el mecanismo de colapso en las estructuras es un aspecto difícil de determinar con exactitud. Por tal motivo, y debido a la necesidad de evitar que se produzca un mecanismo de piso blando, con la formación de articulaciones plásticas en ambos extremos de las columnas, se asumirá la ocurrencia de este fenómeno como el criterio de falla en las estructuras.

Al considerarse la base empotrada, la primera rótula plástica que se genera es en una de las vigas del séptimo nivel (figura 13a). La misma se alcanza para un desplazamiento de 115mm y un cortante basal de 86689 kN. Por otra parte, al considerarse la flexibilidad de la base, para un desplazamiento en el tope de la edificación igual a 100mm y un cortante basal de 58545 kN, se genera una articulación plástica en la base de una columna del primer nivel (figura 13b).

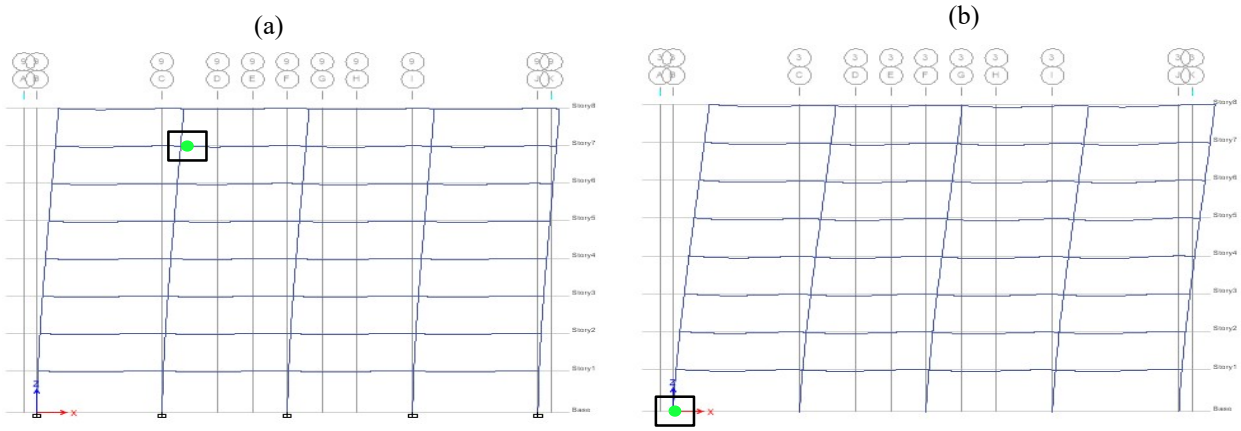

Figura 13: *Aparición de las primeras rótulas plásticas: (a) Base empotrada, (b) Con IDSE.*

Al analizar la progresión de la formación de las rótulas en los elementos se aprecian diferencias. Se puede observar que en el modelo empotrado ya se han formado 30 articulaciones en vigas y ninguna en columnas. Para un cortante basal equivalente, alrededor de 10400 kN, en el modelo con IDSE se generan un número similar de articulaciones que en el empotrado, pero con una configuración más desfavorable (22 en vigas y 7 en columnas). La figura 14 muestra este hecho.

Finalmente, para la edificación unida rígidamente al suelo, el mecanismo de piso se alcanza en el último nivel cuando el desplazamiento en el tope es 235mm y el cortante basal 169245 kN (figura 15a). Al incorporar la interacción, este mismo mecanismo se obtiene con 248mm de desplazamiento en el tope y 135239 kN de cortante basal (figura 15b).

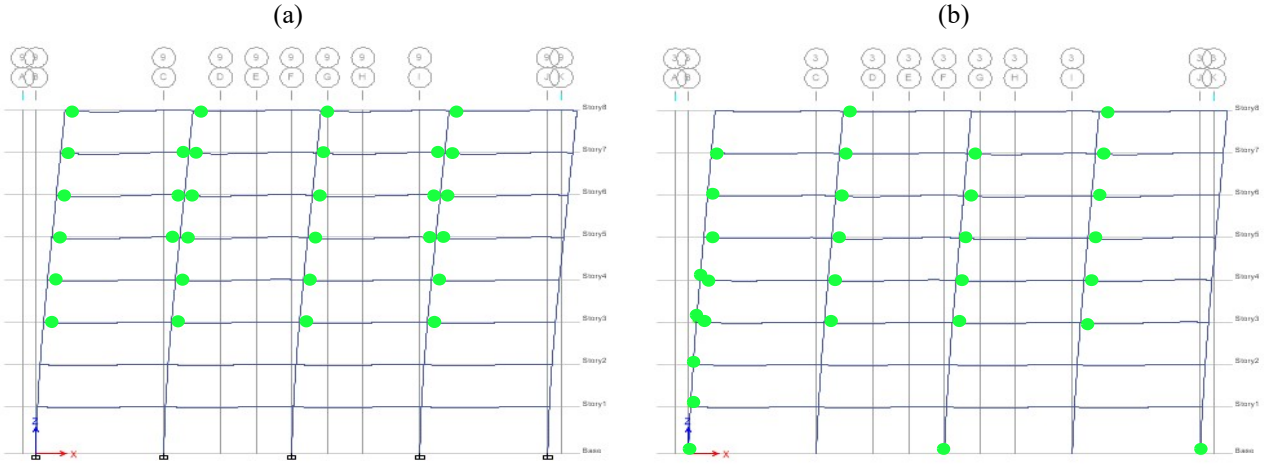

Figura 14: *Progresión de la aparición de rótulas plásticas: (a) Base empotrada, (b) IDSE.*

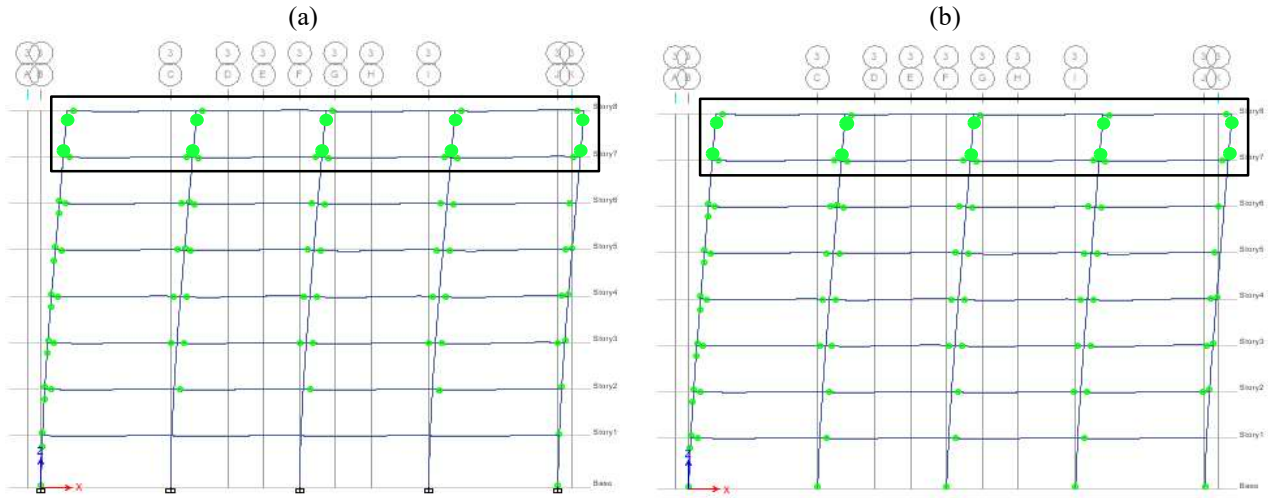

Figura 15: *Mecanismo de piso: (a) Base empotrada, (b) IDSE.*

A partir de estos resultados se puede concluir que la inclusión de la IDSE para la estructura influye en el mecanismo de colapso que se desarrolla. Al considerar la interacción, las primeras articulaciones plásticas se generan en columnas para un cortante basal 32% menor que con base rígida. Por otro lado, la aparición del mecanismo de piso se produce igualmente en el último nivel. Este se alcanza al incluir la IDSE para un cortante basal 20% menor que en la estructura empotrada.

Atendiendo a la progresión de la plastificación de las secciones, una primera conclusión es que la estructura empotrada desarrolla de manera extendida el criterio de columna fuerte – viga débil. Antes de formarse la primera rótula en una columna se han formado 30 de las 64 posibles rótulas, para un 47% de plastificación en vigas. Por otra parte, al analizar lo que sucede en la estructura de base flexible para un mismo cortante basal se observa que se forman un número similar de rótulas, pero en una configuración mucho más desfavorable. En dicha estructura se generan 7 articulaciones en columnas contra ninguna para la edificación empotrada. De esta manera se evidencia que se ha perdido el criterio de columna fuerte – viga débil con la inclusión de la IDSE.

3. Conclusiones

Atendiendo a los resultados se concluye que la estructura cumple con los requerimientos de desplazamientos en el tope y límites de deriva por piso. El cortante basal se mantiene constante y las fuerzas por piso sufren una modificación no significativa manteniéndose por debajo del 5%. Los valores de desplazamiento en el punto de fluencia efectiva de la curva de capacidad aumentan con la modelación de la IDSE denotando una pérdida de rigidez global de la estructura. El punto de desempeño se desplaza hacia la derecha del espectro de demanda al considerarse la IDSE. Se producen modificaciones desfavorables en los modelos de base flexible, llevando a las estructuras a niveles de desempeño no aceptado en la norma cubana [7]. Se producen cambios en el mecanismo de colapso generando rótulas plásticas para menores valores de cortante basal. Se demuestra que se pierde el criterio de columna fuerte – viga débil al plastificarse inicialmente las secciones de algunas columnas y producirse configuraciones con una mayor disipación de energía sísmica en columnas en los modelos con IDSE.

Referencias Bibliográficas

[1] G. Villarreal Castro, *Interacción sísmica suelo-estructura en edificaciones con plateas de cimentación*. Trujillo: Editora & Imprenta Gráfica Norte SRL, 2017.

[2] Z. Corratgé Yzaguirre, J. d. P. Phala Quispe, W. Cobelo Cristiá, and J. O. Martínez Cid, "Influencia de la altura en la respuesta estructural de una edificación considerando la interacción suelo-estructura," *Ciencia & Futuro,* vol. 10, no. 1, pp. 130-148, 2020a.

[3] Z. Corratgé Yzaguirre, D. d. l. C. Álvarez Martín, W. Cobelo Cristiá, and J. O. Martínez Cid, "Influencia de la interacción suelo-estructura en los mecanismos de colapso de un edificio de hormigón armado," *Revista Ciencia y Construcción,* vol. 1, no. 3, pp. 32-43, 2020b.

[4] A. Tena Colunga, "Interacción suelo-estructura. Reflexiones sobre su importancia en la respuesta dinámica de estructuras durante sismos," *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras,* vol. 24, no. 2, pp. 141-165, 2019.

[5] D.-P. N. Kontoni and A. A. Farghaly, "Seismic response of adjacent unequal buildings subjected to double pounding considering soil-structure interaction," *Computation,* vol. 6, no. 1, p. 10, 2018.

[6] E. Tapia Hernández and J. S. García Carrera, "Comportamiento de estructuras de acero durante los sismos de septiembre de 2017," *Ingeniería sísmica,* no. 101, pp. 36-52, 2019.

[7] *NC-46, "Construcciones sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y la construcción." Oficina Nacional de Normalización*, 2017.

[8] *ACI-318 "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary" American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA*, 2019.

[9] *NZS-3101.1 "Concrete Structures Standard. Part 1: The design of concrete structure; Part 2: Commentary (Incorporating Amendment No. 1, 2 and 3)" New Zealand Standards (NZS)*, 2017.

[10] L. Fernandez Sola and I. Leon, "Diferencias en los mecanismos de colapso de edificios de acero sobre base rígida y base flexible," in *XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, 2008.

[11] *ASCE/SEI "Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures"* 2017.

[12] *NC-207 "Requisitos generales para el diseño y construcción de estructuras de hormigón" Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba*, 2019.

[13] L. R. Fernández Sola and J. Avilés López, "Efectos de interacción suelo-estructura en edificios con planta baja blanda," *Ingeniería sísmica,* no. 79, pp. 71-90, 2008.

[14] F. Behnamfar and M. Banizadeh, "Effects of soil–structure interaction on distribution of seismic vulnerability in RC structures," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* vol. 80, pp. 73-86, 2016.