

Comparación de sistemas estructurales en edificio de 5 pisos: Base fija vs. interacción suelo-estructura por modelo Barkan-Savinov en Arequipa, Perú

Comparison of structural systems in a 5-story building: Fixed base vs. Soil-structure interaction by Barkan-Savinov model in Arequipa, Peru

Comparaçãõ de sistemas estruturais em edifício de 5 andares: Base fixa vs. Interaçãõ solo-estrutura pelo modelo Barkan-Savinov em Arequipa, Peru

Rosmery Mamani¹, Mirian Ramos², Genner Villarreal^{3(*)}, Arnaldo Falcón⁴

Recibido: 13/08/2024

Aceptado: 30/10/2024

Resumen. - Esta investigación evalúa la variabilidad del resultado estructural contemplando el sistema de interacción suelo-estructura (ISE) aplicado al edificio de 5 pisos con estructura de concreto el cual considera el sistema dual en Arequipa, distrito de Miraflores.

La investigación tiene un método no experimental – descriptiva, el edificio fue analizado por medio del modelo dinámico realizado por los científicos D.D. Barkan - O.A. Savinov y su modelamiento con base fija de suelo intermedio (S2), teniendo en cuenta el análisis de sismicidad dinámica modal espectral, en el cual se consideran los lineamientos en base al RNE E.030 y el análisis que compara el modelo dinámico de base fija y el modelo con interacción suelo-estructura.

Palabras clave: Interacción suelo-estructura, modelamiento numérico, respuesta en el comportamiento estructural.

(*) Autor de Correspondencia

¹ Ingeniero Civil. Universidad de San Martín de Porres (Perú), pao96.ml@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0006-8669-7372>

² Ingeniero Civil. Universidad de San Martín de Porres, mirianramosparillo@usmp.pe, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0004-6204-7223>

³ PhD. Universidad de San Martín de Porres, gvillarreal@usmp.pe, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1768-646X>

⁴ Magister. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, pcinafal@upc.edu.pe, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0579-8424>

Summary. - This research evaluates the variability of the structural performance contemplating the soil structure interaction (SSI) system applied to the 5-storey building with concrete structure which considers the dual system in Arequipa, district of Miraflores.

The research has a non-experimental - descriptive method, the building was analyzed by means of the dynamic model made by the scientists D.D. Barkán - O.A. Savinov and its modeling with fixed base, of intermediate soil (S2) taking into account the analysis of dynamic spectral-modal seismicity, in which the guidelines based on the RNE E.030 are considered, and the analysis comparing the dynamic model of fixed base and the model with soil - structure interaction.

Keywords: Soil structure interaction, numerical modeling, structural behavior response.

Resumo. - Esta pesquisa avalia a variabilidade do resultado estrutural considerando o sistema de interação solo-estrutura (ISE) aplicado ao edifício de 5 andares com estrutura de concreto que considera o sistema dual em Arequipa, distrito de Miraflores.

A pesquisa possui método não experimental – descritivo, o edifício foi analisado através do modelo dinâmico realizado pelos cientistas D.D. Barkan-O.A. Savinov e sua modelagem com base fixa de solo intermediário (S2), levando em consideração a análise de sismicidade dinâmica modal espectral, na qual são consideradas as diretrizes baseadas na RNE E.030 e a análise que compara o modelo dinâmico de base fixa. e o modelo com interação solo-estrutura.

Palavras-chave: Interação solo-estrutura, modelagem numérica, resposta no comportamento estrutural.

1. Introducción. - El Perú está situado en una zona sísmica de las más activas del mundo, y se pueden producir fuertes terremotos en la zona. La fuga de la energía sísmica puede producir incrementos comparables a los terremotos del año 1746 y terremotos de 8,8 Mw o menos. Asimismo, alrededor del 83% que compone a la población de Arequipa (INEI, 2020), están propensos a sismos severos.

En Miraflores distrito de Arequipa, el número de casas de concreto, sistemas duales se están aumentando, por lo que es muy importante garantizar la seguridad de la estructura brindando procesamiento directo y modelado estructural de los edificios. Dado que los daños sísmicos varían según las condiciones del terreno, se requiere una investigación conjunta entre el suelo, los cimientos y la superestructura. Los suelos y las estructuras deben verse como un sistema que interactúa entre sí, por lo que la falla de cualquier parte del sistema puede afectar la estructura. Estudiarlo de forma aislada no es algo aplicado en la vida real (Rodríguez, 2019).

En la actualidad, la interacción suelo-estructura (ISE) es ampliamente investigada, y este problema generalmente se considera como una relación dinámica entre el suelo y los cimientos (Villarreal, 2020). A pesar de ello, cabe señalar que el inconveniente actual de la ISE está lejos de un planteamiento práctico porque hay muchos espectros que no pueden resolverse en modelos matemáticos y físicos. Por esta razón, este es un problema amplio para los investigadores. La efectividad de los modelos ISE cuando se analiza y diseña estructuralmente permite asegurar que una estructura no pueda separarse del terreno (Villarreal, Cerna y Espinoza, 2021).

Al no considerar la ISE en el análisis y diseño de estructuras en terreno blando, no es aceptable porque afecta no sólo las características dinámicas y las fuerzas de diseño sino también al movimiento total del cual la estructura es capaz. Esto es cierto tanto para estructuras en suelos blandos y porosos como para estructuras en suelos duros (Tena, 2019).

Se tiene como antecedentes de investigación a los siguientes autores:

(Arquiñego & Velásquez 2020) El presente trabajo se realiza debido a los eventos sísmicos que se tuvo en Ica del año 2007, que produjo desastres en hospitales, carreteras y viviendas. Por lo que se realizó una edificación bajo el sistema aporticado y zapatas aisladas en el Distrito de Cercado de Lima. La finalidad de la investigación era ejecutar un análisis dinámico en un modelo tipo suelo – estructura, para así poder ver certeramente el comportamiento dinámico de las cimentaciones esto debido a los sismos que altera la interacción suelo-estructura y así poder ejecutar una edificación segura. Se ha considerado la aplicación de la Norma E-030, también se utilizó el software ETABS. De acuerdo a los resultados se obtuvo que las vibraciones que se derivan de entre piso aumentan de 0.57%, 3.15% y 21.75%.

(Franco & Gálvez 2021) tiene como objetivo en su investigación analizar la interacción suelo – estructura para cimentaciones superficiales de vivienda de dos pisos sobre relleno antrópico, Cieneguilla – Lima 2021. La vivienda familiar en donde se realizó la investigación se encuentra asentado sobre relleno antrópico, por lo que presentaría fallas estructurales y esto produciría fisuras en el concreto, esta edificación no soportaría una sobrecarga y puede producir un colapso de la edificación. En esta investigación, se obtuvo la respuesta que la edificación, la cual, se encuentra en una zona de relleno antrópico, se verificó el incremento de desplazamientos de entrepisos hasta 54.77% y el aumento de periodo de vibración de 0.7774s, las fuerzas axiales disminuyeron 54.27%, las fuerzas cortantes disminuyeron 54.27% y el momento flector disminuyó 46.36%.

(Prada & Mateo, 2022) El objetivo del proyecto de investigación es concluir la interacción suelo-estructura de un edificio con oficinas de 6 pisos y 2 sótanos, esta investigación intenta incrementar comparaciones de las diferentes respuestas, cambiando las condiciones del suelo sobre donde estaría cimentado por lo que se tiene que tomar el efecto de la ISE. Se ejecutará el análisis para suelos S1, S2 y S3 según la norma E.030 (2018). Se utilizó el programa SAP2000 en donde se modeló cada caso y se realizó el análisis estático.

(Villarreal, Cerna & Espinoza, 2021) se encamina en su investigación a desarrollar métodos de cálculo dinámico de edificaciones que reflejen la práctica internacional en el diseño de estructuras que brinden confianza y seguridad, se lleva a cabo una investigación en una edificación residencial de cinco niveles con muros de ductilidad limitada y se analiza la ISE para los modelos de Barkan D.D. - Savinov O.A. y la Norma Rusa, se utilizó el programa SAP2000 con las siguientes conclusiones: Considerar la ISE permite acercar la investigación a la realidad y las fuerzas estructurales asociadas a la actividad sísmica se distribuyen entre los muros estructurales y la cimentación.

(Miao et al., 2020) investigan la interacción dinámica de sistemas de los edificios sobre el suelo que cuenta con una estación de metro sujeta a movimientos producidos en el suelo, conocido como estructura arena-arena-superficie (SSSI). Se realizó un análisis numérico basado en pruebas vibratorias teniendo la reacción sísmica que compone el edificio, túnel y un suelo. Para verificar el modelo numérico, los resultados se comparan con registros experimentales. Luego del proceso que se modela, desarrollando con el software ABAQUS, y rápidamente se mejoró el sistema de modelamiento automático para generar sistemas aéreos multiestación para el cálculo del sitio. Durante el cálculo, se ejecutó el procedimiento del modelo Davidenkov modificado para tener en cuenta la no linealidad de los suelos blandos. Se estudió el efecto de las comunicaciones en la interpretación sísmica de las estaciones subterráneas mediante un sistema de modelización automatizada. Se eligió la relación entre la aceleración inferior y superior para evaluar las interacciones dinámicas del sistema complejo. Se consideran en el estudio los factores influyentes del edificio como la distancia horizontal y en esta estación de metro, así como los niveles de los edificios, la altura total de la profundidad que comprende la estación subterránea. Teniendo como resultado diversos aspectos cruciales, como la cantidad de construcciones y la profundidad de la excavación, influyen significativamente.

(Zhang, Esmailzadeh Seylab, & Taciroglu, 2019) se investiga el tema “ABAQUS Toolbox for Soil-Structure Interaction Analysis”. Es bien sabido que la interacción suelo-estructura (ISE) tienen efectos significativos durante los sismos muy severos, convirtiendo dicho efecto a un factor importante que diseña estructuras resistentes a los sismos. Este análisis de ISE se realiza mediante métodos directos o indirectos. En ambas opciones, el modelo numérico representa el dominio computacional truncado y reducido. Actualmente, las funciones antes mencionadas no se disponen para investigadores e ingenieros, es por ello, que se implementa en ABAQUS el denominado Método de Reducción de Dominio y Ecuaciones Perfectas para calcular y definir las fuerzas de nodos. Verifican su precisión y estabilidad que se implementa en las regiones de terreno uniformes y heterogéneas, ondas SV verticales y horizontales, también los problemas bidimensionales y tridimensionales. Por último, presentan ejemplos de aplicación utilizando las funciones implementadas: extrayendo funciones de impedancia y realizando un análisis en su respuesta de estructuras enterradas bajo ondas de choque. El código implementado para DRM y PML se distribuye para uso general.

(Tena, 2019) su investigación evidencia la utilidad al incorporar ISE en el análisis estructural de suelos sólidos y cimientos superficiales y su aplicación simple y original a suelos compresibles que se ubica en la ciudad de México, se realizaron estudios con aportes de ISE. Se optó por estructuras construidas sobre relleno con cimentaciones poco profundas y estructuras construidas sobre terreno blando, se discute el daño de las edificaciones estudiadas luego de un gran sismo con base en el detalle de las investigaciones realizadas para estructuras existentes. Se registró el comportamiento sísmico durante los sismos y se obtuvieron las propiedades dinámicas mediante ensayos de vibración dinámica. Por lo tanto, se ve la importancia de modelar estructuras y las relaciones suelo-estructura, no sólo para estructuras en terrenos blandos e irregulares, sino también para estructuras en terrenos rígidos.

(Castro & Pérez 2020) de acuerdo a su proyecto de investigación es desarrollar un modelo estructural contemplando la interacción sísmica del suelo para los 3 tipos de suelos (A, C y E) y tiene la finalidad de considerar el modelo de una edificación y su objetivo principal es saber el comportamiento de los elementos estructurales dependiendo de la calidad del suelo. El resultado obtenido en el cálculo de las zapatas, se determina la importancia de la influencia de las cadenas de cimentación porque actúan como resortes laterales y esto aumenta la rigidez lateral de la zapata.

(Pinto y Ledezma, 2019) en su estudio de investigación, examinan edificios altos y su comportamiento sísmico, considerando la interacción dinámica suelo-estructura (DSSI) y realizar un análisis bidimensional utilizando elementos finitos. Los resultados muestran las fuerzas laterales del muro, que modifican la respuesta sísmica. De igual forma, para el análisis simple utilizado antes de las normas de diseño estructural, se muestra que es importante tener en cuenta todas las variables como la profundidad del subsuelo, las características del terreno y las edificaciones cercana.

(Calderín, Almenarez y Boada, 2020) de acuerdo el estudio su apreciación se centró en los edificios de 18 pisos en la ciudad más propensa a sismos en Cuba, por medio de un estudio que compara al diseño de la Norma Mexicana con la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, utilizando un modelo simple que toma en cuenta la reducción de la ductilidad de la edificación debido a la extensión del período base. Los resultados obtenidos con base en el código para sismos antes mencionado se presentan con las siguientes conclusiones. Sin tomar en cuenta la norma NC 46:2017 de

Cuba, se calcula una mayor resistencia al corte, lo que redonda en un mejor diseño y un aumento de los indicadores económicos. Los diferentes valores de desplazamiento horizontal y valores de corte de "X" son superiores a los del estándar americano.

2. Análisis Sísmico Dinámico – Modelo Base Fija. - Tenemos una edificación de categoría “C” (oficinas) en consecuencia, la carga sísmica conforme a la norma de diseño sismorresistente del Perú E.030 considera el aporte del 100%CM y 25%CV.

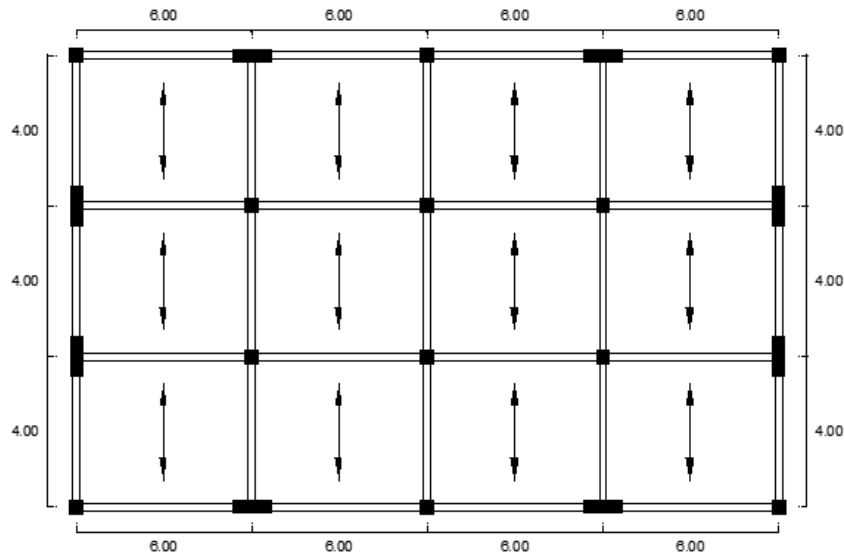


Figura 1.- Planta típica primer piso.

2.1. Validación del Factor R. - Para el sistema dual, se contrarrestan las fuerzas sísmicas combinando muros y pórticos estructurales. La repartición de la fuerza cortante a lo largo de los muros se sitúa en un porcentaje de 20 % y el 70 % de la fuerza cortante en la base del edificio.

Story	Load Case/Combo	VX (tonf)
Piso 5	SISMO XX Max	43,42
Piso 4	SISMO XX Max	84,18
Piso 3	SISMO XX Max	114,34
Piso 2	SISMO XX Max	134,34
Piso 1	SISMO XX Max	144,08

Tabla I. Fuerzas en dirección XX.

Story	Load Case/Combo	VY (tonf)
Piso 5	SISMO YY Max	41,94
Piso 4	SISMO YY Max	83,91
Piso 3	SISMO YY Max	115,67
Piso 2	SISMO YY Max	137,25
Piso 1	SISMO YY Max	147,80

Tabla II. Fuerzas en dirección YY.

2.2. Vista de placas. -

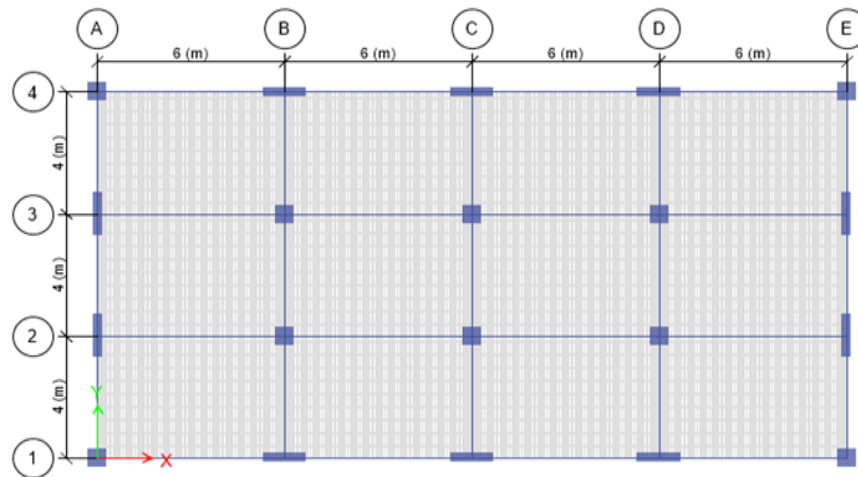


Figura 11.- Vista de placas.

Story	Load Case/Combo	VX (tonf)
Piso 5	SISMO XX Max	45,15
Piso 4	SISMO XX Max	89,86
Piso 3	SISMO XX Max	124,01
Piso 2	SISMO XX Max	147,01
Piso 1	SISMO XX Max	158,27

Tabla III. Fuerzas en dirección X.

Observamos que la base del edificio tiene una fuerza cortante de 158,27 tonf.

Las placas en la dirección XX tienen el siguiente cortante:

Placas: $V_x = 17,53$ tonf $V_x = 17,93$ tonf

Son 6 placas: $V_x = 4(17,53) + 2(17,93) = 105,98$ tonf

Porcentaje = $105,98 \times 100 / 158,27 = 66,96\% < 70\%$

Las placas llevan un cortante sísmico cuyo porcentaje no supera el 70% del cortante en la base. Por ello, el factor $R=7$ es correcto y en su sistema estructural en XX califica como Dual.

Story	Load Case/Combo	VY (tonf)
Piso 5	SISMO YY Max	43,84
Piso 4	SISMO YY Max	89,48
Piso 3	SISMO YY Max	125,11
Piso 2	SISMO YY Max	149,79
Piso 1	SISMO YY Max	162,32

Tabla IV. Fuerzas en dirección Y.

En la base del edificio su fuerza cortante es de 162,32 tonf.

Las placas en la dirección YY tienen el siguiente cortante:

Placa: $V_y = 22,99$ tonf

Son 4 placas: $V_y = 4(22,99) = 91,96$ tonf

Porcentaje = $91,96 \times 100 / 162,32 = 56,65\% < 70\%$

Las placas llevan un cortante sísmico cuyo porcentaje no supera el 70% del cortante en la base. Por ello, el factor $R=7$ es correcto y el sistema estructural en la dirección YY califica como Dual.

2.3. Modos de vibración en base fija. -

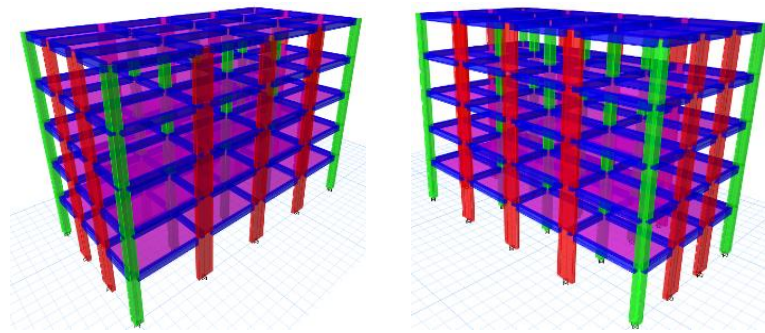


Figura III.- Isométricos de Modelo Estructural.

Las propiedades de la estructura (propiedades dinámicas) son importantes en el análisis modal espectral, su vibración y cada modo contribuye individualmente en la respuesta.

Es necesario tener en cuenta por cada entrespaño al menos 3 modos de vibración, por lo que para este proyecto se han considerado 15 modos. Sin embargo, la selección de los modos que se requiera para la suma de sus masas efectivas garantizan el 90% total de la masa. Se exhibe gráficamente los tres primeros modos, junto con sus respectivos periodos de vibración.

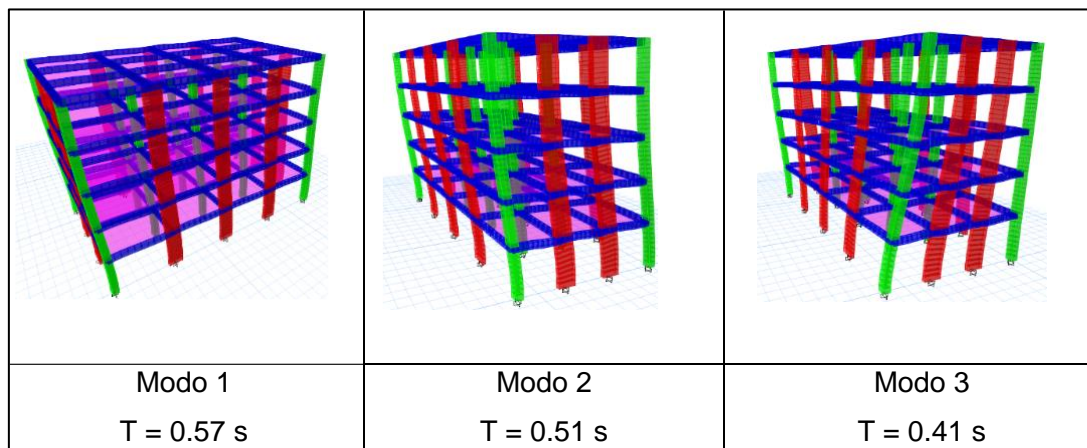


Figura IV.- Modos de vibración.

Mediante la representación gráfica observamos que las vibraciones en el modo 1 y el modo 2 indican traslación en "X" e "Y", respectivamente. Por otro lado, el modo 3, de manera evidente, se visualiza como una rotación en el eje "Z". El cálculo de sus modos vibración sigue un proceso que analiza y adecua la distribución de masas y las propiedades de rigidez.

2.4. Porcentaje de masa participativa en modos de vibración de la estructura. -

TABLE: Modal Participating Mass Ratios						
Case	Mode	Periodo	UX	UY	Sum UX	Sum UY
Modal	1	0,569	81,14%	0,00%	81,14%	0,00%
Modal	2	0,509	0,00%	83,51%	81,14%	83,51%
Modal	3	0,405	0,00%	0,00%	81,14%	83,51%
Modal	4	0,162	12,32%	0,00%	93,46%	83,51%

Modal	5	0,155	0,00%	10,88%	93,46%	94,39%
Modal	6	0,119	0,00%	0,00%	93,46%	94,40%
Modal	7	0,082	0,00%	3,47%	93,46%	97,87%
Modal	8	0,078	4,46%	0,00%	97,92%	97,87%
Modal	9	0,060	0,00%	0,00%	97,92%	97,87%
Modal	10	0,056	0,00%	1,50%	97,92%	99,36%
Modal	11	0,047	0,00%	0,00%	97,92%	99,36%
Modal	12	0,047	1,64%	0,00%	99,56%	99,36%
Modal	13	0,045	0,00%	0,40%	99,56%	99,77%
Modal	14	0,041	0,00%	0,12%	99,56%	99,89%
Modal	15	0,037	0,00%	0,00%	99,56%	99,89%

Tabla V. Masa Participativa.

Se obtuvieron los datos de "participating mass ratio" en ETABS. De acuerdo con la norma E030 se requiere considerar un número mínimo de modos cuya masa participativa supere el 90%. A partir de estos resultados, se pueden realizar las siguientes interpretaciones:

- El modo 1 se caracteriza por una traslación en la dirección "X", lo que se confirma mediante el porcentaje de masa participativa, que alcanza un 81,14%.
- El modo 2 se corresponde con una traslación en la dirección "Y", respaldado por un porcentaje de masa participativa del 83,51%.
- El modo 3 predominante corresponde a una rotación en "Z".
- Hasta el modo 4, la acumulación del porcentaje de masa participativa alcanza un 93,46%, superando el umbral del 90%. Se puede considerar sólo hasta el modo 4 en la dirección XX y no los 15 modos que se considera en software.
- En el modo 5 se tiene la masa participativa del 94,39%, que supera el 90%, podemos limitarnos a considerar solo hasta el modo 5 en la dirección YY, en lugar de los 15 modos que fueron considerados en el programa.
- En concordancia con la norma E030, para este caso, se deben de considerar como mínimo 5 modos de vibración.

2.5. Control de distorsión de entrepisos. - La norma E.030 indica valores máximos permitidos para la distorsión de entrepisos, específicamente 0.007 para concreto armado, como es el caso de la presente investigación. En las figuras V y VI se muestran las distorsiones y desplazamientos en las direcciones X e Y.

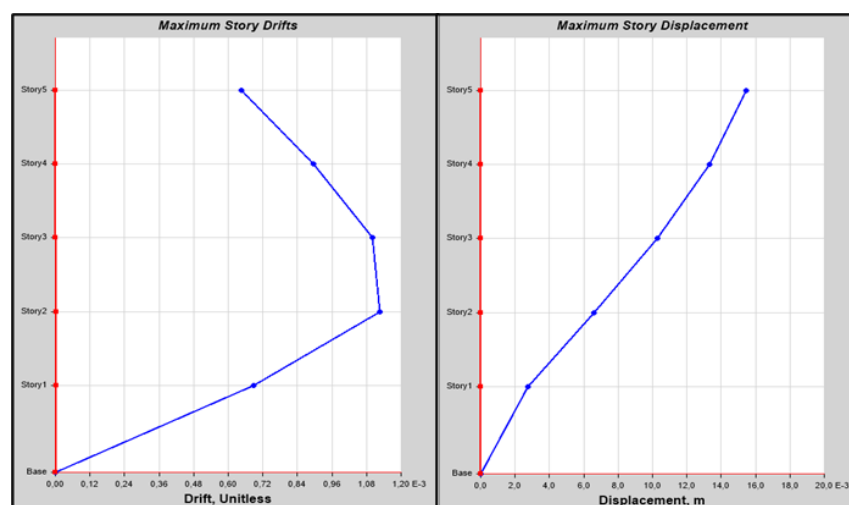


Figura V.- Distorsiones de entropiso y desplazamientos en X.

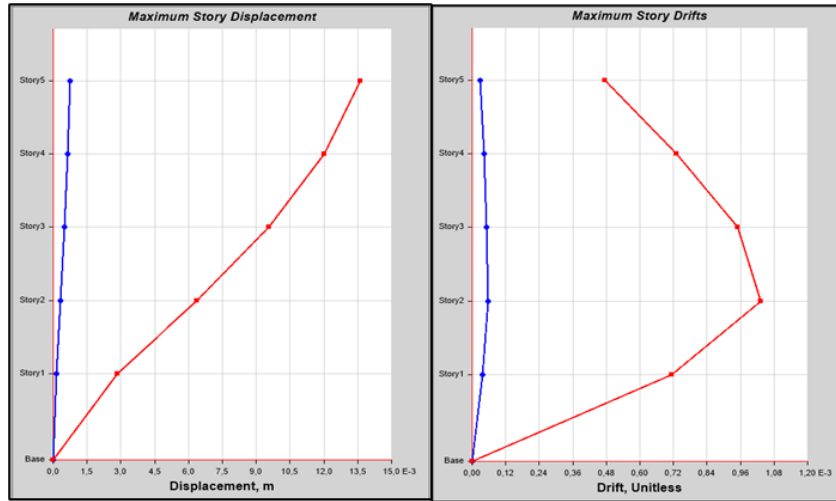


Figura VI.- Distorsiones de entrepiso y desplazamientos en Y.

DIRECCIÓN DE ANÁLISIS: XX						Factor R =	7,00
Piso	Load Case	UX m	h m	D m	DR m	DISTORSIÓN	DISTORSIÓN LIMITE
Piso 5	XX Max	0,015457	3,40	0,081	0,011	0,0033	0,0070
Piso 4	XX Max	0,013306	3,40	0,070	0,016	0,0047	0,0070
Piso 3	XX Max	0,010292	3,40	0,054	0,020	0,0058	0,0070
Piso 2	XX Max	0,006567	3,40	0,034	0,020	0,0059	0,0070
Piso 1	XX Max	0,002753	4,00	0,014	0,014	0,0036	0,0070

Tabla VI. Distorsión de entrepiso en la dirección X.

Máxima distorsión = 0,0059

Máxima distorsión permisible = 0,0070

Máxima distorsión < Máxima distorsión permisible: correcto

DIRECCIÓN DE ANÁLISIS: YY						Factor R =	7,00
Piso	Load Case	UX m	h m	D m	DR m	DISTORSIÓN	DISTORSIÓN LIMITE
Piso 5	YY Max	0,012119	3,40	0,064	0,007	0,0022	0,0070
Piso 4	YY Max	0,010720	3,40	0,056	0,011	0,0034	0,0070
Piso 3	YY Max	0,008545	3,40	0,045	0,015	0,0044	0,0070
Piso 2	YY Max	0,005690	3,40	0,030	0,016	0,0048	0,0070
Piso 1	YY Max	0,002563	4,00	0,013	0,013	0,0034	0,0070

Tabla VII. Distorsión de entrepiso en la dirección Y.

Máxima distorsión = 0,0048

Máxima distorsión permisible = 0,0070

Máxima distorsión < Máxima distorsión permisible: correcto

3. Análisis Sísmico Dinámico Modal Espectral – Modelo ISE. -

3.1. Recopilación de datos del Estudio de Mecánica de Suelos. - Habiendo realizado el estudio de mecánica de suelos (EMS) para el presente proyecto, a fin de tener las propiedades del suelo de fundación y sus condiciones geotécnicas físico y mecánicas, se llevó a cabo el procedimiento mediante el análisis sísmico dinámico del edificio de 5 pisos. Al modelo numérico se incorporaron los resultados, considerando las propiedades geotécnicas del estudio de suelos. Revisado los estudios se tiene como conclusión que pertenece a la categoría de suelo intermedio "S2" con las características siguientes:

Del EMS, se cuenta con datos de propiedades del suelo de fundación a ser empleados para el análisis ISE:

- Clasificación de suelo: Arena arcillosa de baja plasticidad
- Módulo de elasticidad del suelo $E_s = 20 \text{ MPa}$
- Densidad del suelo $\rho_s = 0,10 \text{ tonf.s}^2/\text{m}^4 = 1,00 \text{ kN.s}^2/\text{m}^4$
- Coeficiente de Poisson del suelo $\mu_s = 0,35$
- Capacidad portante del suelo $q_{adm} = 1,09 \text{ kgf/cm}^2$

Piso	Estado	Localización	P (tonf)
Piso 1	Dead	Top	792,61
Piso 1	Dead	Bottom	867,49
Piso 1	Live	Top	259,20
Piso 1	Live	Bottom	259,20
Piso 1	Dead	Top	443,28
Piso 1	Dead	Bottom	443,28

Tabla VIII. Cargas acumuladas del 1er piso.

$$\text{Peso} = 867,49 + 443,28 + 259,20$$

$$\text{Peso} = 1569,97 \text{ tonf}$$

3.2. Cálculo de masas de la platea de cimentación y coeficientes de rigidez del modelo D.D. Barkan – O.A. Savinov. -

En la platea de cimentación sus masas experimentan traslaciones en los ejes centroidales "X, Y, Z" y rotaciones alrededor de los ejes de contacto del suelo - platea (designados como X', Y', Z'), se determinan mediante el enfoque de una lámina rectangular delgada, utilizando las dimensiones totales como punto de referencia.

Para el cálculo de los coeficientes de rigidez por el modelo dinámico D.D. Barkan – O.A. Savinov, se siguió el procedimiento claramente explicado en el capítulo 2 del libro "Interacción suelo-estructura en edificaciones con platea de cimentación" del Dr. Villarreal

Masas traslacionales:

$$M_x = 21,14 \text{ tonf.s}^2.m$$

$$M_y = 21,14 \text{ tonf.s}^2.m$$

$$M_z = 21,14 \text{ tonf.s}^2.m$$

Masas rotacionales:

$$M_{\phi x'} = 1015,20 \text{ tonf.s}^2.m$$

$$M_{\phi y'} = 254,16 \text{ tonf.s}^2.m$$

$$M_{\psi z'} = 1268,40 \text{ tonf.s}^2.m$$

Coefficientes de rigidez de la platea:

$$K_x = 398\,260,80 \text{ tonf/m}$$

$$K_y = 398\,260,80 \text{ tonf/m}$$

$$K_z = 505\,728,00 \text{ tonf./m}$$

$$K_{\varphi x} = 30\,744\,576,00 \text{ tonf. m}$$

$$K_{\varphi y} = 6\,877\,440,00 \text{ tonf. m}$$

3.3. Diseño numérico con ISE. - El diseño con ISE involucra a la representación del suelo el cual cuenta con elementos elásticos deformables. En el modelo dinámico Barkan, los grados de libertad son limitados durante el giro en el eje "Z", considerando cinco de los seis grados de libertad.

- Al liberar los nudos y crear el material rígido para la platea se realizará la asignación de masas.

Story	Label	Unique Name
Base	540	640
GUID: 3a944fae-b6ac-4f8d-adfe-967352c29310		

Object Data	
Geometry	Assignments
Assignments > Restraints RZ Springs COEFICIENTES Diaphragm From Shell Object Panel Zone None > Mass UX; UY; UZ; RX; RY; RZ Include in Analysis Mesh No > Groups 1 Group	

Masa traslacional:
$M_x = 21,14 \text{ tonf. s}^2.m$
$M_y = 21,14 \text{ tonf. s}^2.m$
$M_z = 21,14 \text{ tonf. s}^2.m$
Masa rotacional:
$M_{\varphi x'} = 1015,20 \text{ tonf. s}^2.m$
$M_{\varphi y'} = 254,16 \text{ tonf. s}^2.m$
$M_{\psi z'} = 1268,40 \text{ tonf. s}^2.m$

Figura VII.- Cuadro de Asignación de Masas.

- Asignación de coeficientes de rigidez.

General Data Property Name: COEFICIENTES Display Color: [Color Selection] Property Notes: [Modify/Show Notes...] Spring Stiffness Options: <input checked="" type="radio"/> User Specified/Link Properties <input type="radio"/> Based on Soil Profile and Footing Dimensions Simple Spring Stiffness in Global Directions: Translation X: 398260,8 tonf/m Translation Y: 398260,8 tonf/m Translation Z: 505728 tonf/m Rotation about X-Axis: 30744576 tonf-m/rad Rotation about Y-Axis: 6877440 tonf-m/rad Rotation about Z-Axis: 0 tonf-m/rad	Coefficientes de rigidez de la platea: $K_x = 398\,260,80 \text{ tonf./m}$ $K_y = 398\,260,80 \text{ tonf./m}$ $K_z = 505\,728,00 \text{ tonf./m}$ $K_{\varphi x} = 30\,744\,576,00 \text{ tonf. m}$ $K_{\varphi y} = 6\,877\,440,00 \text{ tonf. m}$
Assignments > Restraints RZ Springs COEFICIENTES Diaphragm From Shell Object Panel Zone None > Mass UX; UY; UZ; RX; RY; RZ Include in Analysis Mesh No > Groups 1 Group	

Figura VIII.- Cuadro de Asignación de Rigidez en la platea.

- Resultados de modos del modelamiento ISE.

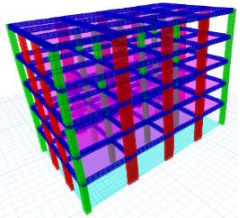
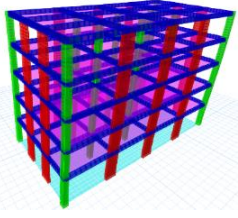
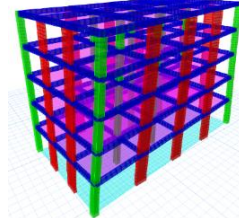
		
Modo 1 T = 0.76 s	Modo 2 T = 0.66 s	Modo 3 T = 0.58 s

Figura IX.- Modos de vibraciones considerando la ISE.

Como se observa, las formas de vibración son representadas gráficamente: las traslaciones en "X" e "Y" corresponden al Modo 1 y el Modo 2. En el Modo 3, visualmente se aprecia que implica una rotación en el eje "Z".

En el análisis de los modos de vibración se ha considerado la rigidez y la distribución de sus masas. En la norma E.030 se indica que se deben de considerar un número de modos que superen el 90% de la masa participativa.

En la tabla IX se muestran las masas participativas para los 15 modos de vibración.

TABLE: Modal Participating Mass Ratios						
Case	Mode	Periodo	UX	UY	Sum UX	Sum UY
Modal	1	0,756	80,71%	0,00%	80,71%	0,00%
Modal	2	0,656	0,00%	82,36%	80,71%	82,36%
Modal	3	0,580	0,00%	0,00%	80,71%	82,36%
Modal	4	0,170	0,00%	0,00%	80,71%	82,36%
Modal	5	0,168	12,60%	0,00%	93,31%	82,36%
Modal	6	0,159	0,00%	11,79%	93,31%	94,16%
Modal	7	0,083	3,64%	0,00%	96,96%	94,16%
Modal	8	0,083	0,00%	2,92%	96,96%	97,08%
Modal	9	0,078	0,00%	0,00%	96,96%	97,08%
Modal	10	0,050	0,00%	1,08%	96,96%	98,16%
Modal	11	0,048	1,29%	0,00%	98,25%	98,16%
Modal	12	0,043	0,00%	0,00%	98,25%	98,16%
Modal	13	0,036	0,00%	0,21%	98,25%	98,37%
Modal	14	0,033	0,25%	0,00%	98,50%	98,37%
Modal	15	0,028	0,00%	0,00%	98,50%	98,37%

Tabla IX. Porcentaje de masa participativa en modos de vibración de la estructura.

Los resultados fueron extraídos del programa ETABS "participating mass ratio". De acuerdo con la norma E030 se requiere considerar un número mínimo de modos cuya masa participativa supere el 90%. A partir de estos resultados, se pueden realizar las siguientes interpretaciones:

- El modo 1 se caracteriza por una traslación en "X", evidenciado por un porcentaje de masa participativa del 80,71%.
- El modo 2 refleja un porcentaje de masa participativa del 82.36% implicando una traslación en "Y".
- El tercer modo que predomina, se caracteriza por una rotación en "Z".
- En el modo 5 la acumulación del porcentaje de la masa participativa es de 93,31%, superando el 90%. Se sugiere considerar solo hasta el modo 5 en la dirección X en lugar de los 15 modos contemplados en el programa.
- Hasta el modo 6 la acumulación del porcentaje de masa participativa es del 94,16%, superando el 90%. Se propone considerar solo hasta el modo 6 en la dirección Y en lugar de los 15 modos contemplados en el programa.
- En concordancia con la norma E030, para este caso, se deben de considerar como mínimo 5 modos de vibración.

3.4. Control de distorsiones de entrepisos. - La norma E.030 indica valores máximos permitidos para la distorsión de entrepisos, específicamente 0.007 para concreto armado, como es el caso de la presente investigación. En las figuras X y XI se muestran los desplazamientos y distorsiones en las direcciones X e Y.

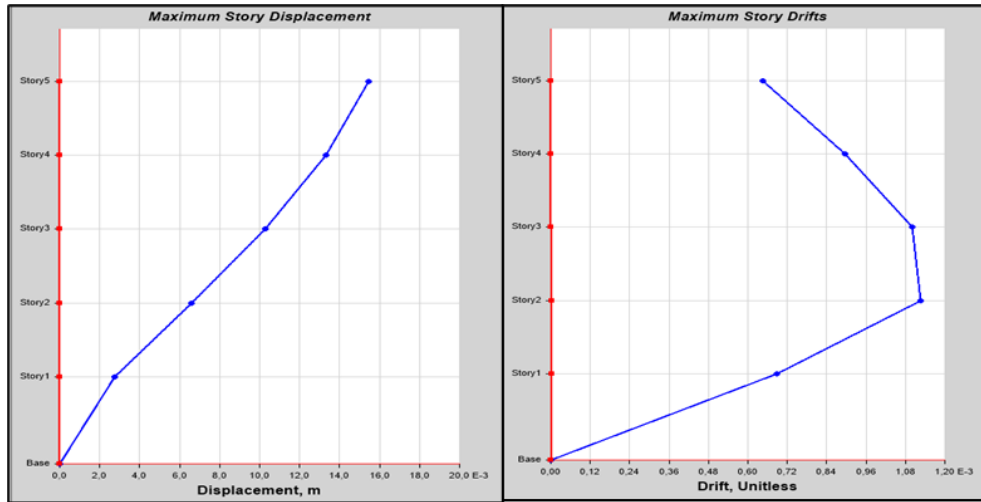


Figura X.- Desplazamientos y distorsiones de entrepiso en X.

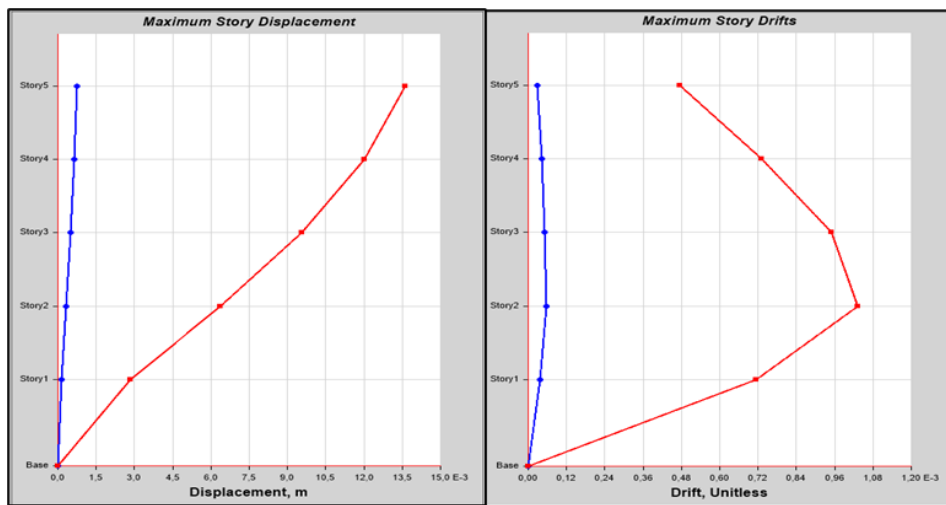


Figura XI.- Desplazamientos y distorsiones de entrepiso en Y.

DIRECCIÓN DE ANÁLISIS: XX						Factor R =	7,00
Piso	Load Case	UX m	h m	D m	DR m	DISTORSIÓN	DISTORSIÓN LIMITE
Piso 5	XX Max	0,022200	3,40	0,117	0,019	0,0055	0,0070
Piso 4	XX Max	0,018651	3,40	0,098	0,022	0,0065	0,0070
Piso 3	XX Max	0,014413	3,40	0,076	0,025	0,0074	0,0070
Piso 2	XX Max	0,009603	3,40	0,050	0,026	0,0076	0,0070
Piso 1	XX Max	0,004709	4,00	0,025	0,025	0,0062	0,0070

Tabla X. Distorsión de entrepiso en la dirección X.

Máxima distorsión = 0,0076
 Máxima distorsión permisible = 0,0070
 Máxima distorsión > Máxima distorsión permisible: incorrecto

DIRECCIÓN DE ANÁLISIS: XX						Factor R =	7,00
Piso	Load Case	UX m	h m	D m	DR m	DISTORSIÓN	DISTORSIÓN LIMITE
Piso 5	YY Max	0,019043	3,40	0,100	0,014	0,0042	0,0070
Piso 4	YY Max	0,016318	3,40	0,086	0,018	0,0053	0,0070
Piso 3	YY Max	0,012882	3,40	0,068	0,021	0,0063	0,0070
Piso 2	YY Max	0,008820	3,40	0,046	0,023	0,0067	0,0070
Piso 1	YY Max	0,004496	4,00	0,024	0,024	0,0059	0,0070

Tabla XI. Distorsión de entrepiso en la dirección Y.

Máxima distorsión = 0,0067

Máxima distorsión permisible = 0,0070

Máxima distorsión < Máxima distorsión permisible: correcto

4. Análisis comparativo del modelo base fija y el modelo con interacción suelo-estructura. -

4.1. Periodos de vibración. - Se realiza el comparativo de los periodos de vibración en los modos del edificio con modelo base fija.

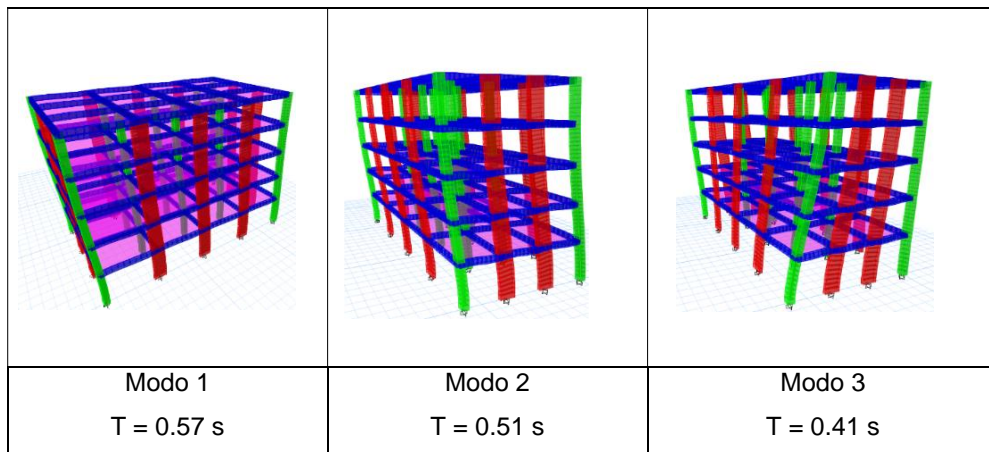


Figura XII.- Modos de vibración del edificio con base fija.

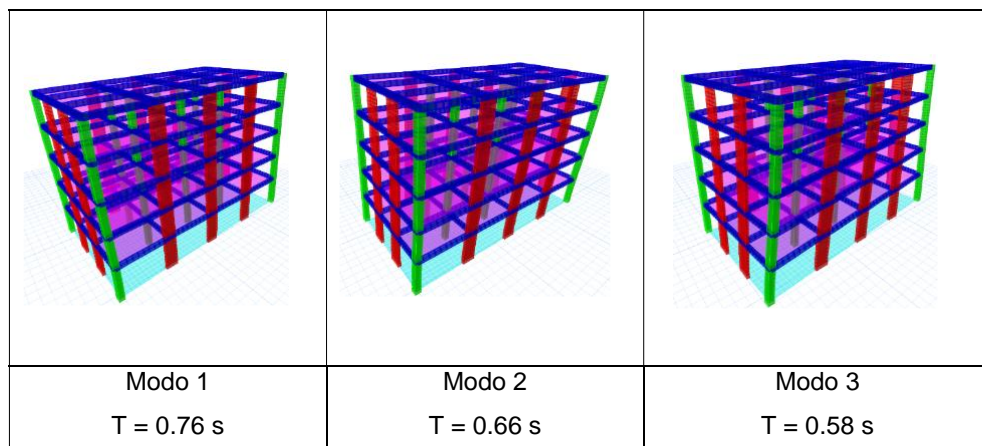


Figura XIII.- Modos de vibración del edificio con interacción suelo-estructura.

Observamos que en los modos 1, 2 y 3 se registró un aumento del 33,33%, 29,41% y 41,46%, respectivamente, en el modelo con ISE. También se observa que se presenta traslación en las dos primeras formas modales, sin embargo, se tiene una forma rotacional en el tercer modal.

4.2. Desplazamientos laterales. - Los desplazamientos en las direcciones "X" y "Y" en los modelos de base fija e ISE presentan una variación importante, siendo muy necesario para identificar posibles daños y anticipar la necesidad de juntas de separación sísmica. En el modelo ISE se obtienen mayores desplazamientos.

- Desplazamientos con base fija e ISE en X.

Variación en el desplazamiento total del piso 5: + 44,44%
Variación en el desplazamiento total del piso 4: + 40,00%
Variación en el desplazamiento total del piso 3: + 40,74%
Variación en el desplazamiento total del piso 2: + 47,06%
Variación en el desplazamiento total del piso 1: + 78,57%

- Desplazamientos con base fija e ISE en Y.

Variación en el desplazamiento total del piso 5: + 56,25%
Variación en el desplazamiento total del piso 4: + 53,57%
Variación en el desplazamiento total del piso 3: + 51,11%
Variación en el desplazamiento total del piso 2: + 53,33%
Variación en el desplazamiento total del piso 1: + 84,62%

4.3. Distorsión de entrepisos. - Se analizan las distorsiones de entrepiso para los modelos de base fija e ISE, siendo el valor máximo para la norma E030 de 0.007 y obteniéndose mayores distorsiones para el modelo ISE en las direcciones X e Y.

- Desplazamientos con base fija e ISE en X.

Variación en el desplazamiento relativo del piso 5: + 72,73%
Variación en el desplazamiento relativo del piso 4: + 37,50%
Variación en el desplazamiento relativo del piso 3: + 25,00%
Variación en el desplazamiento relativo del piso 2: + 30,00%
Variación en el desplazamiento relativo del piso 1: + 78,57%

- Desplazamientos con base fija e ISE en Y.

Variación en el desplazamiento relativo del piso 5: + 50,00%
Variación en el desplazamiento relativo del piso 4: + 63,64%
Variación en el desplazamiento relativo del piso 3: + 40,00%
Variación en el desplazamiento relativo del piso 2: + 43,75%
Variación en el desplazamiento relativo del piso 1: + 84,62%

4.3. Fuerza internas. -

Dirección X: Pórtico 1

Placa

Modelo con base fija:

Axial $P = 5,19$ tonf

Corte $V = 17,96$ tonf

Momento flector $M = 72,93$ tonf-m

Modelo con base flexible:

Axial $P = 5,10$ tonf Reducción en 1,73%

Corte $V = 14,05$ tonf Reducción en 21,77%

Momento flector $M = 56,83$ tonf-m Reducción en 22,08%

Viga

Modelo con base fija:

Corte $V = 4,71$ tonf

Momento flector $M = 10,85$ tonf-m

Modelo con base flexible:

Corte $V = 4,01$ tonf Reducción en 11,86%

Momento flector $M = 9,22$ tonf-m Reducción en 15,02%

Dirección Y: Pórtico A

Placa

Modelo con base fija:

Axial $P = 17,05$ tonf

Corte $V = 25,08$ tonf

Momento flector $M = 81,23$ tonf-m

Modelo con base flexible:

Axial $P = 14,10$ tonf Reducción en 17,30%

Corte $V = 21,73$ tonf Reducción en 13,36%

Momento flector $M = 70,17$ tonf-m Reducción en 13,62%

Viga

Del modelamiento con base fija:

Corte $V = 14,09$ tonf

Momento flector $M = 18,32$ tonf-m

Del modelamiento con base flexible:

Corte $V = 12,44$ tonf Reducción en 11,71%

Momento flector $M = 16,17$ tonf-m Reducción en 11,74%

5. Conclusiones. -

- a) En el modelo ISE se tiene un aumento del 33,33%, 29,41% y 41,46% en los modos 1, 2 y 3. También observamos que para ambos modelos del edificio los primeros dos modos son presentados en traslación, sin embargo, para el tercer modo es rotacional.
- b) En la dirección X hay un incremento promedio en los desplazamientos absolutos del orden de 50,16% y en la dirección Y un incremento promedio en los desplazamientos absolutos del orden de 59,78% del modelo ISE referente al de base fija.
- c) En la dirección X hay un incremento promedio en las distorsiones de entrepiso del orden de 48,76% y en la dirección Y un incremento promedio en las distorsiones de entrepiso del orden de 56,40% del modelo ISE referente al de base fija.
- d) Se observa que existe en la dirección X una reducción del cortante basal del orden de 17,97% y en la dirección Y una reducción del orden de 6,36% del modelo ISE referente al de base fija.
- e) Se observa que para el modelo ISE las placas en la dirección X experimentan una disminución de la fuerza axial, fuerza cortante y momento flector, del orden del 1,73%; 21,77% y 22,08%, respectivamente.
- f) Se observa, las placas que van en dirección Y sufren una reducción de la fuerza axial, fuerza cortante y momento flector del orden del 17,30%; 13,36% y 13,62% en el modelo ISE referente al de base fija.
- g) Se observa que las vigas en la dirección X sufren una reducción de la fuerza cortante y momento flector del orden del 11,86% y 15,02% en el modelo ISE referente al de base fija.
- h) Se observa que las vigas en la dirección Y sufren una reducción de la fuerza cortante y momento flector del orden del 11,71% y 11,74% en el modelo ISE referente al de base fija.
- i) Para el diseño de las vigas en la dirección X, las demandas por flexión y corte se reducen en 38,43% en base fija y 30,63% en base flexible.
- j) Para el diseño de las vigas en la dirección Y, las demandas por flexión y corte se reducen en 8,95% en base fija y 9,64% en base flexible.
- k) Para el diseño de las placas en la dirección X, las demandas por flexión y corte se reducen en 9,80% en base fija y 6% en base flexible.
- l) Para el diseño de las placas en la dirección Y, las demandas por flexión y corte se reducen en 7,84% en base fija y 6,76% en base flexible.

Referencias

- [1] Arancibia, D. (2020). Estudio del efecto de la interacción suelo estructura en edificios bajos de albañilería. [Tesis de titulación, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/177340?show=full>.
- [2] Arquíñe, J., & Velázquez, N. (2020). Evaluación de la interacción suelo - estructura en una edificación de 4 pisos, en el distrito de Cercado de Lima. [Trabajo de Investigación para grado de bachiller, Universidad Tecnológica del Perú]. Repositorio Digital Institucional. <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/3473>
- [3] Calderín, F., Almenarez, D. & Boada, D. (2020). Consideración del fenómeno interacción suelo-estructura en edificio prefabricado. *Redalyc UAEMEX*, 1(4), 79–94. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181366194007>.
- [4] Castro, C., & Pérez, G. (2020). Análisis de la interacción suelo – estructura estática para una edificación regular de Hormigón Armado y 3 tipos de suelos. [Tesis de titulación, Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito]. Repositorio Digital Institucional. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18193>
- [5] Franco, T., & Gálvez, Z. (2021). Análisis de la interacción suelo – estructura para cimentaciones superficiales de vivienda de dos pisos sobre relleno antrópico, Cieneguilla - Lima 2021. [Tesis de titulación, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio Digital Institucional. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/66182>
- [6] Instituto Nacional de Estadística e Informática (2020). Estado de la población peruana. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1743/Libro.pdf
- [7] Miao, Y., Zhong, Y., Ruan, B., Cheng, K. & Wang, G., (2020). Seismic response of a subway station in soft soil considering the structure-soil-structure interaction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 106, 103629. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103629>
- [8] Pinto, F. J., & Ledezma, C. (2019). Interacción suelo-estructura en edificios de gran altura con subterráneos en Santiago, Chile. *Obras y proyectos*, (25), 66-75. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132019000100066>
- [9] Prada, G., & Mateo, I. (2022). Influencia de la interacción suelo-estructura en la respuesta sísmica de un edificio de oficinas de 6 pisos y 2 sótanos considerando diferentes condiciones de suelo. [Tesis de titulación, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Digital Institucional. <https://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/189457>
- [10] Reglamento Nacional de Edificaciones E.030. (2019). Disponible en línea: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2366641/51%20E.030%20DISE%20C3%91O%20SISMORRESISTENTE%20RM-043-2019-VIVIENDA.pdf>
- [11] Rodríguez, S. (2019). Fundamentos de ingeniería geotécnica suelos y cimentaciones. https://www.academia.edu/38931233/INGENIER%C3%8DA_GEOT%C3%89CNICA_2019_Suelos_y_Cimentaciones_LIBRO
- [12] Tena, A. (2019). Soil-structure interaction. Reflections about its importance in the dynamic response of structures during earthquakes. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 24(2), 141-165 <https://docplayer.es/189980156-Soil-structure-interaction-reflections-about-its-importance-in-the-dynamic-response-of-structures-during-earthquakes.html>
- [13] Villarreal, G. (2020). Interacción Suelo Estructura en Edificaciones con Zapatas Aisladas. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 25 (3), 311-332. <https://drive.google.com/file/d/1EeF12nEpNgS5-ZK158cmuaJB9Owb0Whk/view>
- [14] Villarreal, G., Cerna, M., & Espinoza, C. (2021). Seismic Interaction of Soil-Structure in Buildings with Limited Ductility Walls on Foundation Plates. <https://drive.google.com/file/d/1LQVzhICZ8utu-OqWO519LJTuuDM1HxSo/view>
- [15] Zhang, W., Seylabi, E.E. & Taciroglu, E. (2019). An ABAQUS toolbox for soil structure interaction analysis. *Computers and Geotechnics*, 114, 103143. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103143>

Nota contribución de los autores:

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

RM ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

MR ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

GV ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

AF ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Nota de aceptación: Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.