



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v9i1>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

Soil – Structure Interaction for reinforced concrete buildings, through dynamic models

Interação solo-estrutura para edifícios de concreto armado, por meio de modelos dinâmicos

Kevin Ricardo Proaño Viscarra ^I
kevin.proano.26@est.ucacue.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-7365-4107>

Luis Mario Almache Sánchez ^{II}
lalmaches@ucacue.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-4711-5054>

Carlos Julio Cordero Cabrera ^{III}
carlos.cordero@ucacue.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-6373-6280>

Correspondencia: kevin.proano.26@est.ucacue.edu.ec

***Recibido:** 29 de septiembre de 2022 ***Aceptado:** 28 de octubre de 2022 * **Publicado:** 01 de noviembre de 2022

- I. Ingeniero Civil, Posgradista, Maestría en Ingeniería Civil con Mención en Estructuras Sismorresistentes. Universidad Católica de Cuenca, Azuay, Ecuador.
- II. Docente de la Maestría en Ingeniería Civil con Mención en Estructuras Sismorresistentes, Unidad Académica de Posgrados, Universidad Católica de Cuenca, Azuay, Ecuador.
- III. Docente de la Maestría en Ingeniería Civil con Mención en Estructuras Sismorresistentes, Unidad Académica de Posgrados, Universidad Católica de Cuenca, Azuay, Ecuador.

Resumen

En este artículo, se desarrollará un análisis dinámico con interacción suelo-estructura en una zona de riesgo de la Provincia Francisco Orellana en Ecuador, a través de modelos dinámicos experimentales y la metodología ASCE 41-17, para conocer el comportamiento dinámico de edificios regulares de hormigón armado, con tipo de cimentación de zapatas aisladas. A través de esta metodología se pretende analizar la respuesta dinámica de estructuras de 3, 4 y 5 pisos; el estrato que se considera para el apoyo de cada edificación es una arcilla blanda. De acuerdo a la metodología propuesta se muestran fuerzas cortantes en la base, periodos de vibración, desplazamientos de techo y derivas de piso obtenidas como resultados. Una vez realizado el análisis, se aprecia variaciones en las características dinámicas de las estructuras tipo, teniendo mayor porcentaje de influencia, cuando se tiene la ocurrencia de eventos sísmicos ante mayor degradación del terreno.

Palabras Claves: Interacción Suelo; Estructura; Modelos Dinámicos; Edificios; Evento sísmico.

Abstract

In this paper, a dynamic analysis with soil-structure interaction will be developed in a risk area of the Francisco Orellana Province in Ecuador, through experimental dynamic models and the ASCE 41-17 methodology, to know the dynamic behavior of regular reinforced concrete buildings, with isolated footing foundations. The purpose of this methodology is to analyze the dynamic response of 3, 4 and 5 story structures, the stratum considered for the support of each building is a soft clay and dense sand. According to the proposed methodology, shear forces at the base, vibration periods, roof displacements and floor drifts obtained as results are shown. Once the analysis was performed, variations in the dynamic characteristics of the type structures were observed, with a higher percentage of influence when seismic events occur with greater soil degradation.

Keywords: interação solo; Estrutura; Modelos Dinâmicos; Edifícios; evento sísmico.

Resumo

Neste artigo, uma análise dinâmica com interação solo-estrutura será desenvolvida em uma zona de risco da Província Francisco Orellana no Equador, por meio de modelos dinâmicos experimentais e da metodologia ASCE 41-17, para conhecer o comportamento dinâmico de edifícios regulares de concreto armado, com fundação tipo sapata isolada. Através desta metodologia pretende-se analisar

a resposta dinâmica de estruturas de 3, 4 e 5 pisos, a camada que se considera para o suporte de cada edifício é uma argila mole. De acordo com a metodologia proposta, são mostrados os esforços de cisalhamento na base, períodos de vibração, deslocamentos do telhado e desvios do piso obtidos como resultados. Feita a análise, observam-se variações nas características dinâmicas das estruturas tipo, tendo maior percentual de influência, quando há a ocorrência de eventos sísmicos devido a maior degradação do terreno.

Palavras-chave: Saúde mental; Qualidade; Instituições públicas.

Introducción

El Ecuador registra una alta actividad sísmica y volcánica, zona donde convergen la placa de Nazca y la placa Sudamericana, causantes de terremotos y de eventos naturales de gran destrucción. El artículo presentado por (Li et al., 2014), establece que mediante ciclos se libera tensión acumulada de energía a través de grandes terremotos agrupados, lo que resulta en un período prolongado de mayor riesgo sísmico. Actualmente se considera que la amenaza sísmica en Ecuador es alta, considerando la zona Nor-Oriente una amenaza intermedia. (Jiménez et al., 2021).

De acuerdo al estudio desarrollado por (Aguilar & Ortiz, 2017), indica que las ciudades como Orellana, se caracterizan por presentar distribuciones de suelos blandos, de transición, sectores con peligro de deslizamiento y estratos rocosos. Dicha distribución puede influir de manera importante en el comportamiento de la estructura en el caso de presentarse un evento sísmico de magnitud considerable. Por todos estos factores mencionados, (Ruiz García & Guerrero, 2017), resalta que: cuando una estructura está desplantada sobre un terreno de suelo blando, se vuelve prioritario considerar los efectos de interacción suelo-estructura (ISE).

Contrastando el enfoque tradicional donde la fundación y suelo son infinitamente rígidos, respecto a consideraciones de los parámetros amortiguamiento del suelo y de coeficientes de rigidez, la estructura tendrá mayores deformaciones en el sistema estructural, momentos de segundo orden, incremento de derivas, etc., por lo tanto, es imperativo considerar un análisis de interacción suelo estructura (figura 1), donde los resortes representan el suelo. (Villareal, 2020).

El estudio acerca de la influencia de la interacción suelo – estructura en edificios mediante modelos dinámicos, pueden permitir apreciar de mejor manera las potencialidades que cada uno de mencionados modelos presentan para obtener el comportamiento real de las edificaciones (Gallegos Ortiz, 2015). Esto permitiría que la seguridad quede mejor estructurada a los ocupantes en relación

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

con los proyectos de construcción de edificaciones futuras en la provincia de Francisco de Orellana, sino que permitiría diseñar proyectos con mejores resultados en zonas vulnerables donde el suelo no tenga un comportamiento favorable. (Wani et al., 2022).

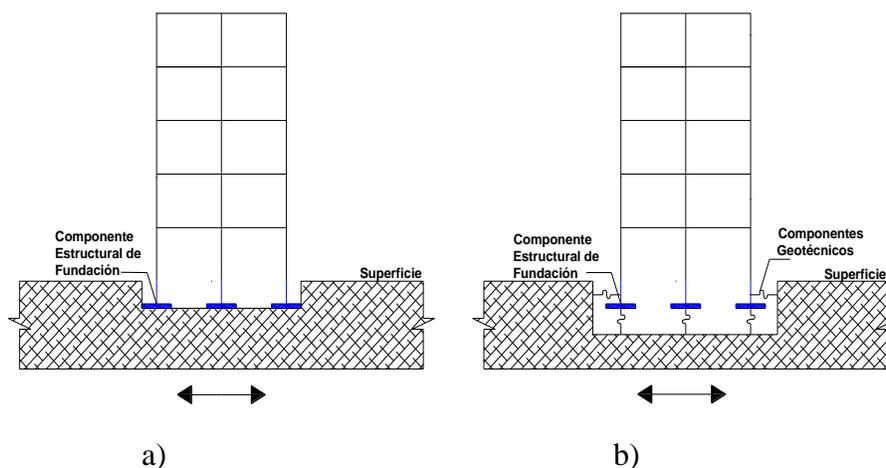


Figura 1. Casos de Estudio.

- a) Estructura considerando Enfoque tradicional
- b) Estructura considerando (ISE).

El estrato de suelo considerado para cada edificación de estudio fue de arcilla blanda, donde en conjunto con los datos obtenidos del tipo de suelo, permitieron determinar el comportamiento dinámico en las estructuras de estudio con restricciones empotradas, mientras que otro análisis fue considerar análisis interacción suelo – estructura. Teniendo ambos casos de estudio una propuesta de cimentación con zapatas aisladas y realizando estos análisis a través del programa Etabs (CSI Computers and STRUCTURES, INC), para poder comparar dichos resultados de acuerdo a la norma vigente en construcción del Ecuador.

Metodología

Dentro de lo que se refiere a la provincia de Orellana (figura 2), está directamente influenciada por la llanura amazónica y la cordillera oriental (Kleemann et al., 2022). Como universo de estudio, los modelos estructurales se ubicarán en la provincia Francisco de Orellana; en el cantón “El Coca”, (UTM: 0283544 N // 9888465 E).

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

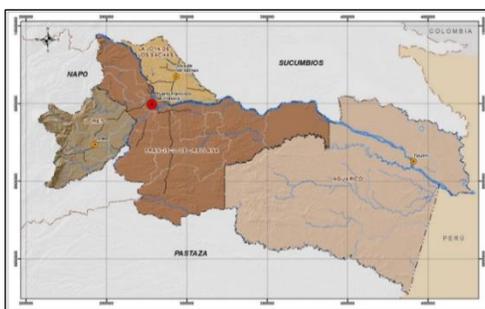


Figura 2. División de la provincia de Orellana.

Ubicación de Ensayos Geofísicos

En la zona de estudio se realizaron 4 líneas sísmicas, que sirvieron para establecer los componentes del subsuelo del terreno, a través, de pruebas de refracción sísmica NEC-SE-GC. (2015). En la (tabla 1), se indica las coordenadas de las 4 líneas sísmicas que fueron ubicadas en el área de estudio.

Tabla 1. Ubicación de Ensayos Geofísicos.

LINEA SÍSMICA	GEÒFONO	UTM		Long. Exploración (m)
		N	E	
LS-14	G1	283541	9888460	55
	G12	283553	9888508	
LS-15	G1	283608	9888475	55
	G12	283559	9888496	
LS-16	G1	283629	9888590	55
	G12	283585	9888548	
LS-17	G1	283527	9888565	55
	G12	283578	9888546	

Perfiles de suelos según su estratigrafía

En la (figura 3), se presenta el perfil sísmico según su estratigrafía V_p, para la línea sísmica Ls-14.

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

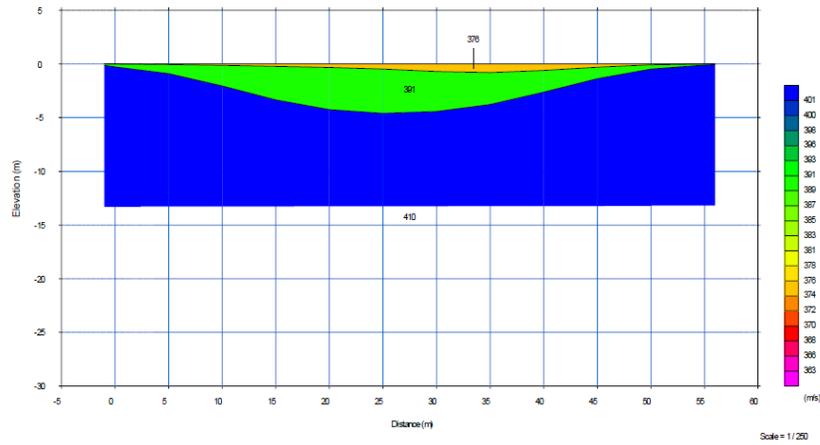


Figura 3. Estratigrafía para Ls-14.

En la (figura 4), se presenta el perfil sísmico según su estratigrafía V_p, para la línea sísmica Ls-15.

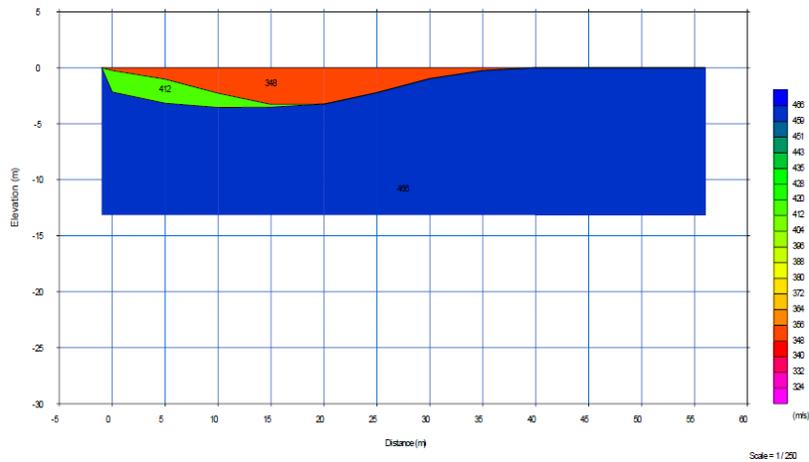


Figura 4. Estratigrafía para Ls-15.

En la (figura 5), se presenta el perfil sísmico según su estratigrafía V_p, para la línea sísmica Ls-16.

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

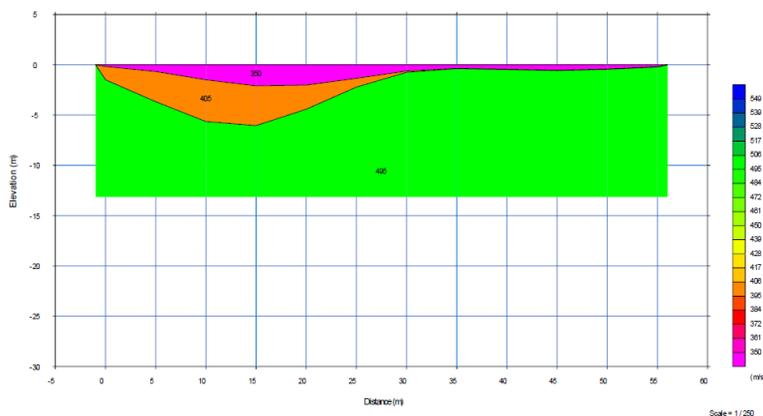


Figura 5. Estratigrafía para Ls-16.

En la (figura 6), se presenta el perfil sísmico según su estratigrafía V_p, para la línea sísmica Ls-17.

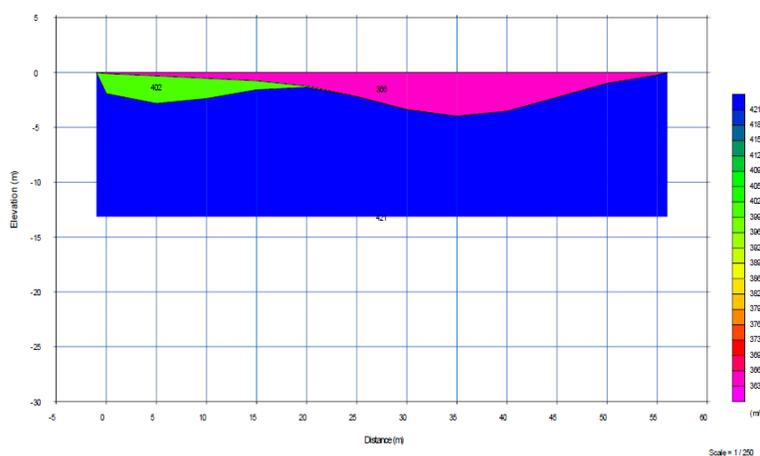


Figura 6. Estratigrafía para Ls-17.

Para complementar la información obtenida en campo y con el objetivo de determinar las propiedades geomecánicas de los estratos encontrados, se realizaron ensayos de laboratorio apoyado por el método sísmico de prospección del subsuelo en donde se basa en la medida de los tiempos de llegada de las ondas tipo p y s generadas en el terreno por una fuente de energía mecánica adecuada (martillo manual, generador de impactos, etc.), (Butchibabu et al., 2023)

Parámetros elásticos y geomecánicos

Respecto a estos parámetros se establece en la (tabla 2), mediante los ensayos sísmicos de refracción realizados, obteniendo los parámetros elásticos y geomecánicos del subsuelo. A continuación, se presentan dichos valores:

Tabla 2. Parámetros Elásticos y Geomecánicos

Línea Sísmica	Variación(m)	Velocidad de Onda		Peso Especifico γ (Kn/m ³)	Relación de Poisson μ	Periodo T (s)
		Vp (m/s)	Vs(m/s)			
Ls-14	0.00-30.00	392.3	161	13.80	0.4	0.75
Ls-15	0.00-30.00	408.6	167	13.92	0.4	0.72
Ls-16	0.00-30.00	416.6	170	13.98	0.4	0.70
Ls-17	0.00-30.00	396.3	162	13.83	0.4	0.74
Promedio						0.73

Dimensiones de planta y elevación

Para los modelos de estudio en lo que se refiere a dimensiones en planta, se tiene para la dirección “X” e “Y”: 4 vanos de 4.5 m y 5 m cada uno dando una longitud total de 19 m. En lo que se refiere a las dimensiones en elevación, se estudió edificios de 3, 4 y 5 pisos, siendo la altura de entrepiso típica de 3 m (figura 7).

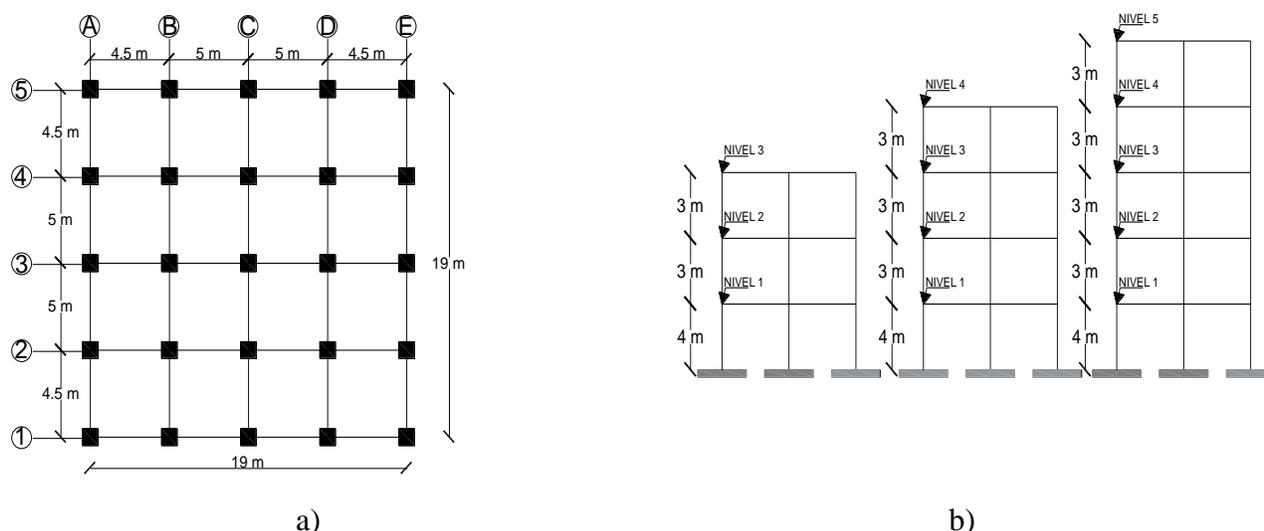


Figura 7. Modelos de Estudio.

- a) Planta tipo de Edificaciones de estudio.
- b) Elevación tipo de Edificaciones de Estudio.

Características geotécnicas para los tipos de suelo

Dentro de la zona de estudio El Coca, se ha definido una estratigrafía idealizada del terreno en toda la profundidad y partiendo del nivel de desplante con el fin de realizar esta comparación. A continuación, se deja todos los parámetros geotécnicos que se usaron dentro del análisis (ISE), y también los factores, según NEC-SE-DS-15, que influyen para obtener los espectros (tabla 3):

Tabla 3. Parámetros Geotécnicos y Factores para los Espectros de Diseño.

Tipo de Suelo	Arcilla Blanda
Zona de Estudio	El Coca
Factor de zona sísmica (Z)	0.25
Perfil de Suelo	E
Factor de Reducción de Resistencia Sísmica (R)	6
Coficiente de Importancia (I)	1
Coef. Configuración de Planta ($\emptyset P$)	1
Coef. Configuración de Elevación ($\emptyset E$)	1
Peso Unitario γ (Kn/m ³)	13.88
Coef. de poisson ν	0.4
V. de onda de corte promedio V_s (m/s)	165

Secciones de elementos estructurales

Las edificaciones propuestas (tabla 4), presentan elementos estructurales que se verificara si cumplen los requisitos de diseño que exige la (NEC-15), para soportar cargas dinámicas. Para consideraciones de losas tanto de entrepiso como de techo, se toma una losa nervada con 0.25 m de espesor.

Tabla 4. Secciones de Elementos Estructurales.

Secciones de elementos estructurales (Edificio de 3 pisos)

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

Nivel	Sección Vigas (m)		Sección Columnas (m)	
	Dirección X	Dirección Y	Externas	Internas
1	0.35 x 0.50	0.35 x 0.50	0.60 x 0.60	0.60 x 0.60
2 y 3	0.35 x 0.45	0.35 x 0.45	0.50 x 0.50	0.50 x 0.50
Secciones de elementos estructurales (Edificio de 4 pisos)				
Nivel	Sección Vigas (m)		Sección Columnas (m)	
	Dirección X	Dirección Y	Externas	Internas
1	0.35 x 0.50	0.35 x 0.50	0.65 x 0.65	0.65 x 0.65
2,3,4	0.35 x 0.45	0.35 x 0.45	0.55 x 0.55	0.55 x 0.55
Secciones de elementos estructurales (Edificio de 5 pisos)				
Nivel	Sección Vigas (m)		Sección Columnas (m)	
	Dirección X	Dirección Y	Externas	Internas
1	0.40 x 0.50	0.40 x 0.50	0.75 x 0.75	0.75 x 0.75
2,3,4,5	0.40 x 0.45	0.40 x 0.45	0.65 x 0.65	0.65 x 0.65

La distribución tanto de rigidez, como de amortiguamiento en cada modelo dinámico con interacción suelo-estructura, se realizó en zonas esquineras, laterales y centrales del sistema de fundación; de esta manera toda la rigidez del sistema fue asignada a la base en cada una de las columnas, a continuación, en (tabla 5), se deja la geometría de las zapatas de fundación.

Tabla 5. Geometría de Zapatas de Fundación.

Tipo de Suelo	Nivel de Piso	Sección de Zapatas (m)			Nivel de Desplante (m)
		Esquineras	Laterales	Centrales	
Arcilla	3	2.7 x 2.7 x 0.35	2.75 x 2.75 x 0.35	3.25 x 3.25 x 0.35	1.5
Blanda	4	3.0 x 3.0 x 0.40	3.35 x 3.35 x 0.40	3.70 x 3.70 x 0.40	1.8

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

5	3.20 x 3.20 x 3.50 x 3.50 x 3.85 x 3.85 x	2.25
	0.45 0.45 0.45	

Acción sísmica

Respecto a la fuerza sísmica en dirección X e Y, se colocaron por medio de espectros de diseño que se desarrollarán según normativa ecuatoriana (NEC-15), para el tipo de suelo considerado en este estudio. En la (figura 8), se muestran los espectros que se utilizan para el desarrollo de los modelos estructurales.

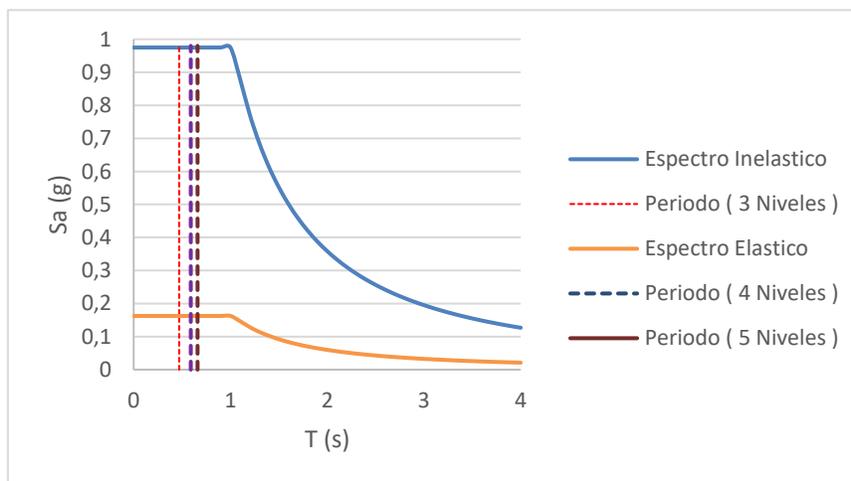


Figura 8. Espectros de Diseño para Arcilla Blanda.

Análisis dinámico

La fuerza cortante en el primer entrepiso del edificio no podrá ser menor que el 85% de la cortante obtenida por el método estático (tabla 6). En el caso de que el $V_{dinámico}$ sea menor que $V_{estático}$, los valores para el diseño deben multiplicarse por el factor $V_{estático}/V_{dinámico}$ (Vargas et al., 2013).

Tabla 6. Verificación de Cortante en la Base

Tipo de Suelo	Tipo de Estructura	$V_{Dinámico}$ (Ton)		85 % $V_{Estático}$ (Ton)		Control	
		Sismo X	Sismo Y	Sismo X	Sismo Y	Sismo X	Sismo Y
Arcilla Blanda	3 niveles	160.48	160.48	156.44	156.44	OK	OK
	4 niveles	215.88	215.88	214.38	214.38	OK	OK
	5 niveles	290.44	290.44	288.25	288.25	OK	OK

Control de derivas inelásticas de Piso.

Una vez que las derivas se han evaluado y están dentro de los máximos permitidos $\Delta_m = 0.00444$ se puede ver que las secciones transversales propuestas y su disposición es correcta (figura 9).

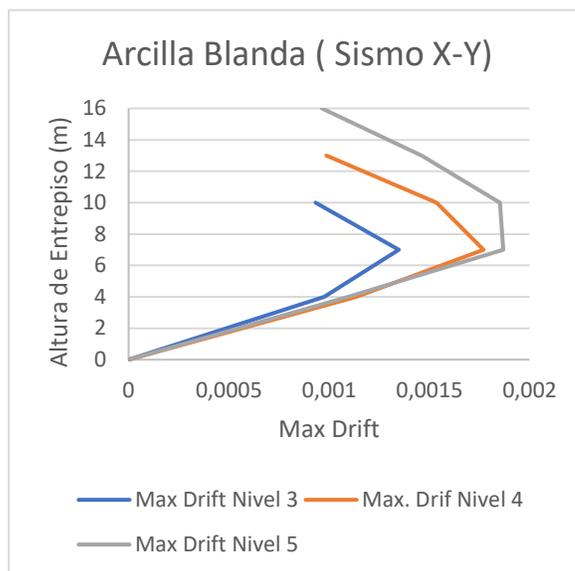


Figura 9. Max. Drift para Arcilla Blanda.

Análisis Dinámico de Interacción suelo-Estructura

En esta investigación se manejó, los siguientes modelos dinámicos experimentales: D.D. Barkan – O.A. Savinov, Norma Rusa SNIP 2.02.05 y A.E. Sargsian. También se utilizó el de la normativa americana ASCE 41-17 de los cuales se obtuvieron coeficientes para el amortiguamiento y la rigidez de las zapatas aisladas, asignados a los casos de estudio.

Respecto al primer modelo dinámico, se basa en que va ocurrir una interacción de la base de fundación respecto a la cimentación, siendo un proceso teórico-experimental, en forma de vibración forzada. Así mismo, el segundo modelo dinámico, se basa en incluir todos los parámetros de suelo, masas y rigideces, para poder así determinar los parámetros de amortiguamiento y rigidez. Mientras tanto el tercer modelo dinámico, prioriza análisis de rigideces en base a la geometría de la cimentación y velocidades de ondas de propagación de los suelos, considerando que la creación del mismo, fue para fines académicos. Finalmente, el último modelo dinámico no es experimental, sino más bien está regido por la norma americana ASCE 41-17, donde recomienda, que se debe obtener la correlación entre el tipo de suelo con la demanda sísmica, para obtener los coeficientes de rigidez. (Villarreal G et al., 2021).

Coefficientes de rigidez y amortiguamiento

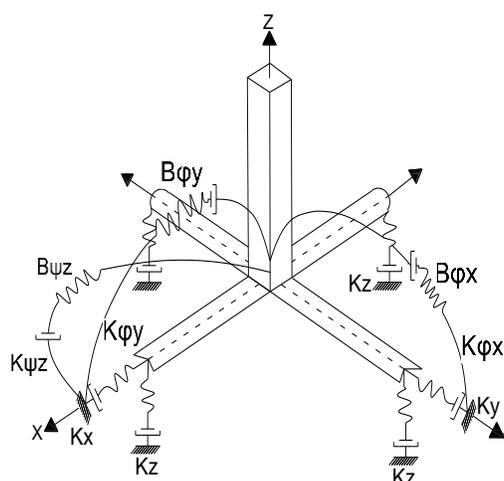


Figura 10. Coeficientes de Rigidez y Amortiguamiento para Zapatas Aisladas.

La flexibilidad de la cimentación se obtuvo de la determinación de los coeficientes de rigidez y características de amortiguamiento. De acuerdo con la (figura 10), se asignaron las propiedades de los resortes traslacionales y rotacionales a través del elemento Spring. Sin embargo, para considerar la amortiguación se usaron elementos Damper, donde se aplicó dichas propiedades.

Dentro de los coeficientes de rigidez se puede considerar los siguientes:

- Rigidez de compresión elástica uniforme K_z ,
- Rigidez de desplazamiento elástico uniforme K_x , K_y ,
- Rigidez de compresión elástica no uniforme K_{ϕ_x} , K_{ϕ_y} y
- de Rigidez de desplazamiento elástico no uniforme K_{ϕ_z} .

También se obtuvo los coeficientes de amortiguamiento que fueron B_z , B_x , B_y , B_{ϕ_x} , B_{ϕ_y} y B_{ϕ_z} , esto quiere decir, que se presentarán vibraciones de rotación en torno al eje vertical, vibraciones horizontal-rotacionales, vibraciones horizontales y verticales.

A continuación, se procede a poner en forma resumida, los valores de los coeficientes de rigidez y amortiguamiento para cada modelo estudio obtenidos por los cálculos:

Modelo D.D. Barkan – O.A. Savinov.

Las fórmulas para obtener los coeficientes de desplazamiento y rotación se muestran en la (figura 11), mientras que los valores obtenidos se establecen en la (tabla 7).

Nº Ec.	Coef. De Desplazamiento y Rotación en la Base.	Simbología
Ec. (1)	$C_z = C_o \left[1 + \frac{2(a+b)}{\Delta A} \right] \sqrt{\frac{p}{p_o}}$	Cx: Coeficiente de desplazamiento elástico uniforme Δ: Coeficiente empírico igual a 1 m-1
Ec. (2)	$C_x = D_o \left[1 + \frac{2(a+b)}{\Delta A} \right] \sqrt{\frac{p}{p_o}}$	Cz, Cφx, Cφy: Coeficientes de compresión elástica uniforme y no uniforme p: Presión estática
Ec. (3)	$C_{φy} = C_o \left[1 + \frac{2(b+3a)}{\Delta A} \right] \sqrt{\frac{p}{p_o}}$	Do= Coeficiente ν: Coeficiente de poisson del suelo
Ec. (4)	$C_{φx} = C_o \left[1 + \frac{2(a+3b)}{\Delta A} \right] \sqrt{\frac{p}{p_o}}$	a, b: Dimensiones de la cimentación en los ejes X e Y respectivamente.
Ec. (5)	$p = \frac{Peso_{edif} + Peso_{fundc}}{Area_{fund}}$	Co: Coeficiente que se obtiene en la tabla 9 de la referencia (Villarreal, G. 2017), determinado a través de ensayos experimentales para po=0.2 kg/cm2 ; Para arcilla blanda Co=0.8 kg/cm3.
Ec. (6)	$D_o = \frac{1-\nu}{1-0.5\nu} C_o$	

Figura 11. Coeficientes de desplazamiento y rotación en la base. Villarreal, G. (2020).

Tabla 7. Coeficientes de desplazamiento y rotación en la base para Arcilla Blanda.

Rigidez	Tipo de Suelo	Tipo de Estructura	Zona de Zapatas		
			Esquinas	Laterales	Centrales
Cx, Cy (Ton/m³)	Arcilla Blanda	3 niveles	1877	2519	2810
		4 niveles	1856	2186	2687
		5 niveles	1928	2345	2910
Cz (Ton/m³)	Arcilla Blanda	3 niveles	2502	3359	3746
		4 niveles	2474	2915	3582
		5 niveles	2570	3127	3880

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

C_{φx} (Ton/m³)	Arcilla Blanda	3 niveles	3997	5349	5813
		4 niveles	3889	4502	5444
		5 niveles	3999	4795	5858
C_{φy} (Ton/m³)	Arcilla Blanda	3 niveles	3997	5349	5813
		4 niveles	3889	4502	5444
		5 niveles	3999	4795	5858

Las fórmulas para los coeficientes de rigidez de la cimentación en este modelo se muestran en la (figura 12), mientras que los valores obtenidos se establecen en la (tabla 8).

N° Ec.	Coef. Rigidez	Simbología
Ec.(7)	$K_z = C_z A$	A: Área de la base de la cimentación
Ec.(8)	$K_x = K_y = C_x A$	
Ec.(9)	$K_{φy} = C_{φy} I_y$	I _x , I _y : Momentos de inercia de la cimentación respecto a los ejes x e y
Ec.(10)	$K_{φx} = C_{φx} I_x$	

Figura 12. Coeficientes de Rigidez. Villareal, G. (2020).

Tabla 8. Coeficientes de rigidez modelo dinámico D.D. Barkan, O.A Savinov en Arcilla blanda.

Rigidez	Tipo de Suelo	Tipo de Estructura	de Zona de Zapatas		
			Esquinas	Laterales	Centrales
K_x, K_y (Ton/m)	Arcilla Blanda	3 niveles	13683.334	19049.938	29680.625
		4 niveles	16704.341	24532.385	36785.036
		5 niveles	19742.723	28726.254	43133.475
K_z (Ton/m)	Arcilla Blanda	3 niveles	18239.583	25402.438	39567.125
		4 niveles	22266.432	32713.588	49037.584
		5 niveles	26316.823	38305.753	57511.321
K_{φx} (Ton.m)	Arcilla Blanda	3 niveles	17701.414	25493.069	54044.627
		4 niveles	26250.752	47250.181	85024.437
		5 niveles	34943.795	59962.474	107253.393

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

K_{φy} (Ton.m)	Arcilla	3 niveles	17701.414	25493.069	59578.955
	Blanda	4 niveles	26250.755	47250.181	93715.339
		5 niveles	34943.795	59962.474	118221.362

Modelo Norma Rusa SNIP 2.02.05

Las fórmulas para los coeficientes de compresión elástica no uniforme y uniforme, desplazamiento, se muestran en las (figuras 13 y 14), mientras que los valores obtenidos se establecen en las (tablas 9 y 10).

Nº_ Ec.	Coef. De Compresion Elastica Uniforme	Simbología
Ec. (11)	$C_z = b_o E [1 + \sqrt{\frac{A_{10}}{A}}]$	<p>b_o: Coeficiente de corrección de unidad de medida m-1, para el artículo se adopta igual a 1.5.</p> <p>E: Módulo de elasticidad del suelo</p> <p>A₁₀: 10 m²</p> <p>A: Área de la cimentación</p>

Figura 13. Coeficiente de compresión elástica Uniforme. Villareal, G. (2020).

Tabla 9. Coeficientes de Compresión Cz

Tipo de Estructura	Arcilla Blanda		
	E (Ton/m ²)	A (m ²)	Cz (Ton / m ³)
3 niveles	1121	7.29	3651
		7.56	3615
		10.56	3318
4 niveles	1121	9	3453
		11.223	3268
		13.69	3118
5 niveles	1121	10.24	3343
		12.25	3200
		14.82	3062

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

Nº_ Ec.	Coef. De Desplazamiento y Compresión Elastica no Uniforme.	Simbología
Ec. (12)	$C_x = 0.7C_z$	Cx: Coeficiente de desplazamiento elástico uniforme
Ec. (13)	$C_{\psi z} = C_z$	Cz, Cφx, Cφy: Coeficientes de compresión elástica uniforme y no uniforme
Ec. (14)	$C_{\phi x} = C_{\phi y} = 2C_z$	

Figura 14. Coeficientes de Desplazamiento y Compresión elástico no Uniforme. Villareal, G. (2020).

Tabla 10. Coeficientes de desplazamiento y rotación para Arcilla Blanda

Rigidez	Tipo de Suelo	Tipo de Estructura	Zona de Zapatas		
			Esquineras	Laterales	Centrales
Cx, Cy (Ton/m ³)	Arcilla Blanda	3 niveles	2555.627	2530.562	2322.33
		4 niveles	2417.77	2288.142	2183.039
		5 niveles	2340.225	2240.524	2143.845
Cφx (Ton/m ³)	Arcilla Blanda	3 niveles	7301.793	7230.178	6635.228
		4 niveles	6907.913	6537.549	6237.254
		5 niveles	6686.356	6401.497	6125.272
Cφy (Ton/m ³)	Arcilla Blanda	3 niveles	7301.793	7230.178	6635.228
		4 niveles	6907.913	6537.549	6237.254
		5 niveles	6686.356	6401.497	6125.27
Cψz (Ton/m ³)	Arcilla Blanda	3 niveles	3650.896	3615.089	3317.614
		4 niveles	3453.957	3268.775	3118.627
		5 niveles	3343.178	3200.749	3062.635

Las fórmulas para los coeficientes de rigidez propuestos en la Norma Rusa se muestran en la (figura 15), mientras que los valores obtenidos se establecen en la (tabla11).

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

Nº_Ec.	Coef. De Rigidez	Simbología
Ec. (15)	$K_z = C_z A$	A: Área de la cimentación
Ec. (16)	$K_x = K_y = C_x A$	Ix, Iy: Momento de inercia de la cimentación respecto a los ejes x, y
Ec. (17)	$K_{\psi z} = C_{\psi z} I_z$	
Ec. (18)	$K_{\varphi y} = C_{\varphi y} I_y$	Iz: Momento polar de inercia
Ec. (19)	$K_{\varphi x} = C_{\varphi x} I_x$	

Figura 15. Coeficientes de Rigidez. Villareal, G. (2020).

Tabla 11. Norma Rusa SNIP 2.02.05-87, coeficientes de rigidez en Arcilla Blanda.

Rigidez	Tipo de Suelo	Tipo de Estructura	Zona de Zapatas		
			Esquineras	Laterales	Centrales
Kx, Ky (Ton/m)	Arcilla Blanda	3 niveles	18630.524	19137.378	24529.607
		4 niveles	21759.927	25678.676	29885.803
		5 niveles	23963.901	27446.419	31777.135
Kz (Ton/m)	Arcilla Blanda	3 niveles	26615.034	27339.111	35042.296
		4 niveles	31085.61	36683.823	42694.004
		5 niveles	34234.144	39209.17	45395.908
Kφx (Ton.m)	Arcilla Blanda	3 niveles	32337.266	34458.671	61689.042
		4 niveles	46628.414	68614.034	97413.485
		5 niveles	58426.272	80052.055	112146.807
kφy (Ton.m)	Arcilla Blanda	3 niveles	32337.266	34458.671	61689.042
		4 niveles	46628.414	68614.034	97413.485
		5 niveles	58426.272	80052.055	112146.807
Kψz (Ton.m)	Arcilla Blanda	3 niveles	32337.266	34458.671	61689.042
		4 niveles	46628.414	68614.034	97413.485
		5 niveles	58426.272	80052.055	112146.807

Las fórmulas para las amortiguaciones relativas para las vibraciones rotacionales y horizontales para este modelo se muestran en la (figura 16), mientras que los valores obtenidos se establecen en la (tabla 12).

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

:

Nº_Ec.	Amortiguación Relativa
Ec. (20)	$\beta_{\psi z} = 0.3\beta_z$
Ec. (21)	$\beta_{\varphi x} = \beta_{\varphi y} = 0.5\beta_z$
Ec. (22)	$\beta_x = 0.6\beta_z$

Figura 16. Amortiguaciones Relativas. Villareal, G. (2020).

Tabla 12. Amortiguación Relativa en Arcilla Blanda

Coeficiente	Tipo de Suelo	Tipo de Estructura	Zona de Zapatas		
			Esquineras	Laterales	Centrales
β_z	Arcilla Blanda	3 niveles	0.4701	0.4725	0.4932
		4 niveles	0.4834	0.496	0.508
		5 niveles	0.491	0.502	0.513
β_x, β_y	Arcilla Blanda	3 niveles	0.282	0.284	0.296
		4 niveles	0.29	0.298	0.305
		5 niveles	0.295	0.301	0.308
$\beta_{\varphi x}, \beta_{\varphi y}$	Arcilla Blanda	3 niveles	0.235	0.236	0.247
		4 niveles	0.242	0.248	0.254
		5 niveles	0.246	0.251	0.257
$\beta_{\psi z}$	Arcilla Blanda	3 niveles	0.141	0.142	0.148
		4 niveles	0.145	0.142	0.152
		5 niveles	0.147	0.151	0.154

Finalmente, las fórmulas del sistema suelo fundación, para las características de amortiguamiento, se muestran en la (figura 17), mientras que los valores obtenidos se establecen en la (tabla 13).

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

Nº_Ec.	Amortiguamiento del Sistema
Ec. (23)	$B_z = 2\beta_z \sqrt{K_z M_z}$
Ec. (24)	$B_x = B_y = 2\beta_{xx} \sqrt{K_x M_x}$
Ec. (25)	$B_{\psi z} = 2\beta_z \sqrt{K_{\psi z} M_{\psi z}}$
Ec. (26)	$B_{\varphi y} = 2\beta_{\varphi y} \sqrt{K_{\varphi y} M_{\varphi y}}$
Ec. (27)	$B_{\varphi x} = 2\beta_{\varphi x} \sqrt{K_{\varphi x} M_{\varphi x}}$

Figura 17. Características de amortiguamiento del sistema suelo fundación. Villareal, G. (2020).

Tabla 13. Amortiguamiento del sistema suelo fundación en Arcilla Blanda

Coeficiente	Tipo de Suelo	Tipo de Estructura	Zona de Zapatas		
			Esquinas	Laterales	Centrales
B_x, B_y Ton.s /m	Arcilla Blanda	3 niveles	60.835	63.119	88.153
		4 niveles	80.304	99.953	121.978
		5 niveles	96.843	115.897	140.183
B_z Ton.s /m	Arcilla Blanda	3 niveles	121.186	125.737	175.605
		4 niveles	159.97	199.111	242.985
		5 niveles	192.916	230.873	279.25
B_{φx}, B_{φy} Ton.s.m	Arcilla Blanda	3 niveles	53.779	57.818	111.803
		4 niveles	87.802	135.373	200.543
		5 niveles	120.921	172.074	250.48
B_{ψz} Ton.s.m	Arcilla Blanda	3 niveles	44.172	47.544	92.742
		4 niveles	71.987	111.726	166.323
		5 niveles	98.773	141.41	206.959

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

Modelo A.E. Sargsian

Las fórmulas para los coeficientes de rigidez propuestos en A.E. Sargsian se muestran en (Figura 18), mientras que los valores obtenidos se establecen en la (tabla 14).

Nº_Ec.	Coef. De Rigidez	Simbología
Ec. (28)	$K_x = \frac{28.8(1 - u^2)\rho C_2^2 \sqrt{A}}{\pi(7 - 8u)}$	ρ : Densidad del suelo de fundación. A : Área de la base de la cimentación
Ec. (29)	$K_\phi = \frac{8.52\rho C_2^2 I}{\sqrt{\pi}(1 - u)\sqrt{A}}$	I : Momento de inercia del área de la base de la cimentación respecto al eje horizontal. $\Phi = 0.833$
Ec. (30)	$K_z = \frac{\rho C_1^2 \sqrt{A}}{\Phi(1 - u^2)}$	C_1 : Velocidad de propagación de las ondas longitudinales en el suelo de fundación.
Ec. (31)	$C_1^2 = \frac{(1 - u)E}{(1 + u)(1 - 2u)\rho}$	C_2 : Velocidad de propagación de las ondas transversales.
Ec. (32)	$C_2^2 = \frac{E}{2(1 + u)\rho}$	u : Coeficiente de Poisson del suelo

Figura 18. Coeficientes de Rigidez. Villareal, G. (2020).

Tabla 14. Coeficientes de rigidez modelo dinámico A.E. SARGSIAN en Arcilla Blanda.

Rigidez	Tipo de Suelo	Tipo de Estructura	Zona de Zapatas		
			Esquineras	Laterales	Centrales
K_x, K_y (Ton/m)	Arcilla Blanda	3 niveles	2147.54	2187.31	2585
		4 niveles	2386.15	2664.44	2942.92
		5 niveles	2545.23	2783.85	3062.23
K_z (Ton/m)	Arcilla Blanda	3 niveles	9087.6	9255.48	10938.3
		4 niveles	1096.89	11274.86	12452.83
		5 niveles	10770.02	11779.71	12957.68
K_{φx} (Ton.m)	Arcilla Blanda	3 niveles	5157.78	5449.66	8995.43
		4 niveles	7075.14	9851.88	13273.24
		5 niveles	8586.61	11235.07	14953.88
K_{φy} (Ton.m)	Arcilla Blanda	3 niveles	5157.78	5449.66	8995.43
		4 niveles	7075.14	9851.88	13273.24

Tabla 15. Rigideces de fundación en superficie para Arcilla Blanda

Rigidez	Tipo de Suelo	Tipo de Estructura	Rigidez
K_x, K_y, Sur (KN/m)	Arcilla	3 niveles	526220.954
		4 niveles	
		5 niveles	
K_z, Sur (KN/m)	Arcilla	3 niveles	716880.72
		4 niveles	
		5 niveles	
K_{xx}, Sur (KN.m/rad)	Arcilla	3 niveles	55062540.406
		4 niveles	
		5 niveles	
K_{yy}, Sur (KN.m/rad)	Arcilla	3 niveles	55503040.73
		4 niveles	
		5 niveles	
K_{zz}, Sur (KN.m/rad)	Arcilla	3 niveles	68718050.427
		4 niveles	
		5 niveles	

Con estos parámetros se realiza la corrección por factores de empotramiento del terreno, donde las fórmulas se muestran en las (figuras 21 y 22), mientras que los valores obtenidos se establecen en la (tabla 16).

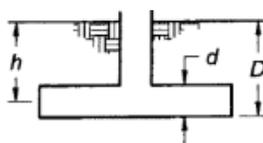


Figura 21. Factores de Corrección por empotramiento. ASCE. (2017).

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

Nº_Ec.	Factores de Corrección por Empotramiento.	Grados de Libertad
Ec. (39)	$B_x = (1 + 0.21 \sqrt{\frac{D}{B}})(1 + 1.6(\frac{h * d * (B + L)}{B * L^2})^{0.4})$	Traslación a lo largo del Eje X
Ec. (40)	$B_y = (1 + 0.21 \sqrt{\frac{D}{B}})(1 + 1.6(\frac{h * d * (B + L)}{L * B^2})^{0.4})$	Traslación a lo largo del Eje y
Ec. (41)	$B_z = (1 + \frac{1}{21} * \frac{D}{B})(2 + 2.6(\frac{B}{L}))(1 + 0.32(\frac{d(B + L)}{B * L})^{\frac{2}{3}})$	Traslación alrededor del Eje z
Ec. (42)	$B_{xx} = (1 + 2.5 * \frac{d}{B})(1 + \frac{2d}{B} * (\frac{d}{D})^{-0.2}) * (\frac{B}{L})$	Balaceo alrededor del Eje X
Ec. (43)	$B_{yy} = (1 + 1.4 * \frac{d}{L})^{0.6} * 1.5 + 3.7(\frac{d}{L})^{1.9}((\frac{d}{D})^{-0.6})$	Balaceo alrededor del Eje y
Ec. (44)	$B_{zz} = (1 + 2.6(1 + \frac{B}{L}) * (\frac{d}{L})^{0.9})$	Torsión alrededor del Eje z

Figura 22. Factores de Corrección por Empotramiento. ASCE. (2017).

Se realiza la corrección por factores de empotramiento del terreno quedando los siguientes valores:

Tabla 16. Factores de Corrección por Empotramiento

Rigidez	Arcilla Blanda		
	3 niveles	4 niveles	5 niveles
β_x	1.3	1.34	1.41
β_y	1.3	1.34	1.41
β_z	1.09	1.11	1.12
β_{xx}	1.22	1.27	1.34
β_{yy}	1.47	1.52	1.60
β_{zz}	1.52	1.62	1.76

Finalmente, las rigideces de fundación confinada del terreno para este modelo los valores obtenidos se establecen en la (tabla 17).

Tabla 17. Rigideces de fundación confinada para Arcilla Blanda

Rigidez	Tipo de Suelo	de Tipo Estructura	de Zona de Zapatas		
			Esquineras	Laterales	Centrales
Kx, Ky, Comb (KN/m)	Arcilla blanda	3 niveles	9590.059	20600.867	44253.714
		4 niveles	9928.932	21328.817	45817.459
		5 niveles	10412.979	22368.622	48051.113
Kz, Comb (KN/m)	Arcilla blanda	3 niveles	11037.362	23709.889	50932.355
		4 niveles	11165.721	23985.624	51524.673
		5 niveles	11343.234	24366.947	52343.813
Kxx, Comb (KN.m/rad)	Arcilla blanda	3 niveles	942561.266	2024761.238	4349487.104
		4 niveles	980704.435	2106698.416	4525500.302
		5 niveles	1040017.329	2234111.314	4799202.053
Kyy, Comb (KN.m/rad)	Arcilla blanda	3 niveles	1144296.398	2458118.189	5280402.036
		4 niveles	1189089.141	2554339.636	5487099.958
		5 niveles	1251796.05	2689043.366	5776463.526
Kzz, Comb (KN.m/rad)	Arcilla blanda	3 niveles	1473630.472	3165576.569	6800127.444
		4 niveles	1564566.318	3360920.238	7219754.585
		5 niveles	1698215.089	3648017.599	7836482.249

Edificaciones modeladas mediante interacción suelo-estructura

Dentro de lo que se refiere a la fase de modelación de las estructuras de estudio, para el análisis de la interacción suelo estructura, se empleó el programa Etabs (CSI Computers and STRUCTURES, INC) . Donde se determinó el comportamiento de los modelos de estudio (figura 23), ante eventos sísmicos, considerando el análisis modal espectral.

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

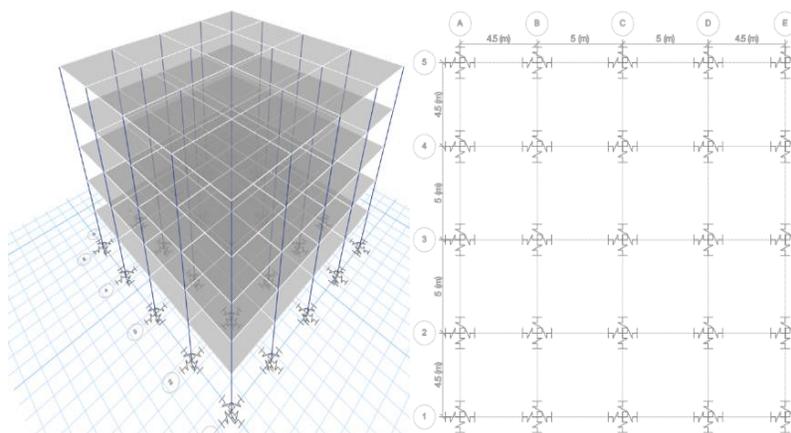


Figura 23. Modelo de 5 Niveles con base flexible en Software ETABS.

Con la obtención de amortiguamientos y rigideces para los distintos modelos dinámicos propuestos, se asignó para cada modelo estructural en su base las propiedades mencionadas y se estableció resortes, centrales, laterales, y esquineros en el software mencionado.

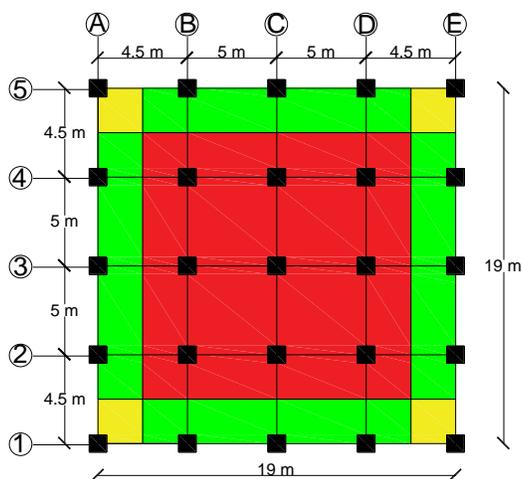


Figura 24. Distribución de Áreas.

Por lo tanto, la región sombreada en marrón, representa el área tributaria de resortes en la esquina, así mismo, la región sombreada en verde, representa el área tributaria de resortes en las zonas laterales y finalmente la región sombreada en rojo, corresponde el área tributaria de resortes en la zona central. Cuando se ingresó toda esta información al modelo, se discretizó los valores de rigidez

total de todo el sistema de fundación, para asignarla en la base de los modelos de estudio, a través de los conceptos de área tributaria (figura 24).

Resultados

Una vez realizados los diferentes modelos dinámicos, en los que se ha considerado la interacción suelo-estructura, en los casos de estudio planteados, se exponen los resultados donde se aprecia variaciones en las características dinámicas de las estructuras tipo.

Periodos de Vibración

Se puede apreciar en la (tabla 18), los valores obtenidos para periodos de vibración, resultado de modelos dinámicos experimentales y metodología ASCE 41-17, respecto a los modelos empotrados.

Tabla 18. Periodo Fundamental de vibración T (s) para los modelos de estudio.

Método	<i>Periodo fundamental de Vibración T(s)</i>					
	Arcilla Blanda					
	3 niveles	Dif(%)	4 niveles	Dif(%)	5 niveles	Dif(%)
Empotrado	0.451		0.562		0.629	
Barkan	0.494	9.53	0.602	7.11	0.677	7.63
Norma Rusa	0.496	9.97	0.598	6.40	0.666	5.88
A.E. Sargsian	0.626	38.80	0.733	30.42	0.835	32.75
ASCE 41-17	0.568	25.94	0.718	27.75	0.841	33.70

Sabiendo que el periodo del suelo de arcilla blanda es 0.73 s como se establece en la (tabla2), los modelos dinámicos A.E Sargsian y ASCE 41-17, para el caso de 4 niveles estarían en resonancia. Teniendo en cuenta, que si no se consideraba interacción suelo-estructura, para este mismo caso, se estaría incurriendo en un problema de diseño estructural.

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

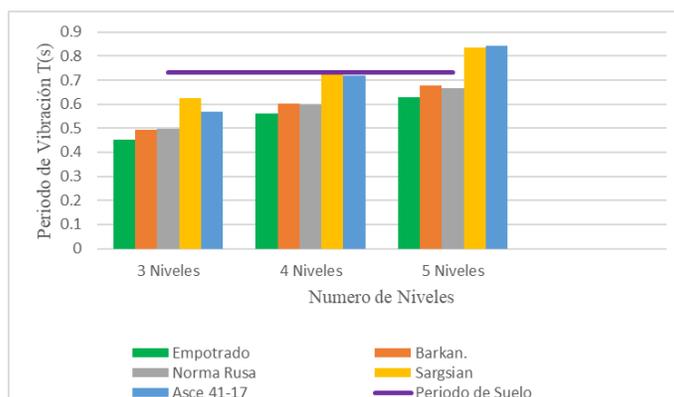


Figura 25. Variación del Periodo de Vibración.

Fuerzas Cortantes en la Base

Se muestra en la (tabla 19), los valores obtenidos para fuerzas cortantes en la base en dirección X e Y, resultado de modelos dinámicos experimentales, metodología ASCE 41-17, respecto a los modelos empotrados.

Tabla 19. Cortante en la base debido al sismo (X-Y)

<i>Cortante en la Base (Sismo X / Sismo Y) - Arcilla Blanda (Vx-Vy) (Ton)</i>						
Método	Arcilla Blanda					
	3 niveles	Dif (%)	4 niveles	Dif (%)	5 niveles	Dif (%)
Empotrado	160.48		215.88		290.44	
Barkan	165.42	3.08	221.42	2.57	299.15	3.00
Norma Rusa	163.23	1.71	218.64	1.28	295.22	1.65
A.E. Sargsian	175.16	9.15	236.44	9.52	322.51	11.04
ASCE 41-17	167.85	4.59	225.21	4.32	303.52	4.50

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

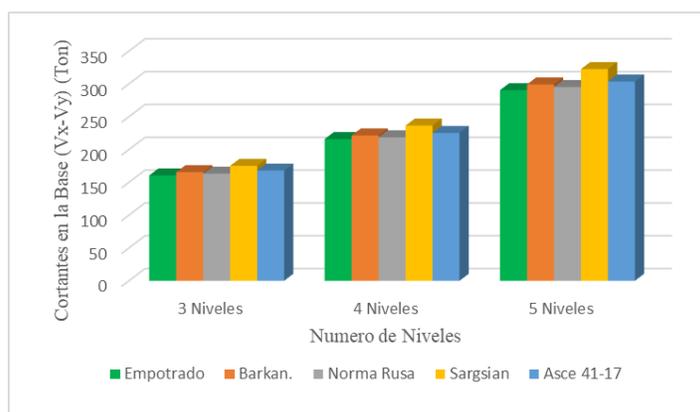


Figura 26. Variación de fuerzas Cortantes en la Base.

Desplazamientos en techo

Los valores presentados en la (tabla 20), corresponden a desplazamiento total en el techo en dirección X e Y, resultado de modelos dinámicos experimentales, metodología ASCE 41-17, respecto a los modelos empotrados.

Tabla 20. Desplazamiento de Techo debido al sismo (X-Y)

Método	Arcilla Blanda					
	3 niveles	Dif (%)	4 niveles	Dif (%)	5 niveles	Dif (%)
Empotrado	10.69		17.32		22.67	
Barkan	12.73	19.08	19.75	14.03	26.23	15.70
Norma Rusa	12.42	16.18	19.42	12.12	26.05	14.91
A.E. Sargsian	12.69	18.70	28.36	63.74	38.87	71.46
ASCE 41-17	12.88	20.49	28.59	65.05	40.43	78.34

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

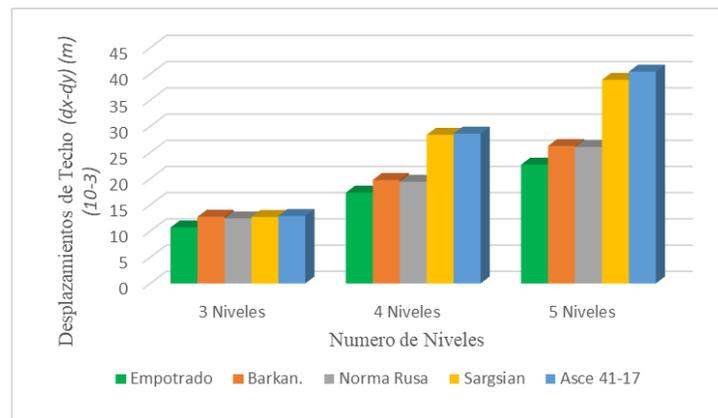


Figura 27. Variación de desplazamientos de techo.

Derivas de Piso

En la (tabla 21), se indica los valores para la máxima deriva de piso de cada una de las estructuras en cada caso de estudio. El valor de control utilizado para deriva es menor o igual al 2%, tal y como se encuentra especificado en la norma ecuatoriana (NEC-SE-DS-15).

Tabla 21. Derivas de piso máximas debido al Sismo X-Y.

<i>Derivas de piso máximas debido a sismo X-Y (%)</i>						
	3 Piso	Dif(%)	4 piso	Dif(%)	5 Piso	Dif(%)
Empotrado	0.607		0.797		0.841	
Barkan	0.657	8.23	0.861	8.03	0.934	11.05
Norma Rusa	0.649	6.91	0.851	6.77	0.925	9.98
A.E. Sargsian	0.766	26.19	1.083	35.88	1.179	46.13
ASCE 41-17	0.797	31.30	1.098	38.51	1.257	49.46

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

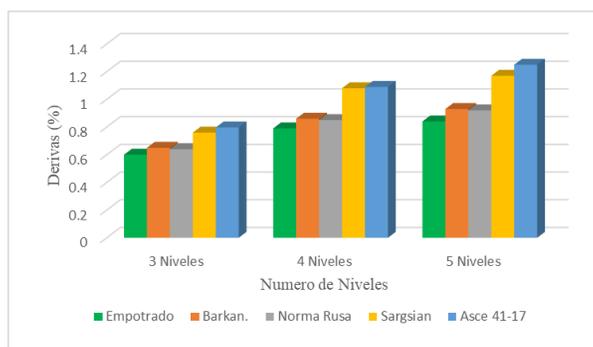


Figura 28. Variación en derivas de piso.

Conclusión

La comparación de los resultados obtenidos de los 4 modelos dinámicos utilizados en esta investigación, nos permite observar que la influencia de la interacción suelo-estructura referente a las características dinámicas de las estructuras, es mayor cuando se utiliza el modelo experimental A.E Sargsian y el propuesto por la normativa americana ASCE 41-17. Mientras que, la menor influencia se aprecia en los modelos experimentales de Barkan y Norma Rusa. Debiendo considerar también, la exigencia de este análisis en la norma ecuatoriana de la construcción.

Los periodos de los modelos de estudio A.E Sargsian y ASCE 41-17, en las edificaciones de 4 niveles, están en torno al del suelo de arcilla blanda, que es (0.73s), encontrándose vulnerables dichas estructuras y representando el riesgo de entrar en resonancia.

El utilizar en la zona de riesgo de estudio, una cimentación con tipo zapatas aisladas, no es una opción económicamente viable, a pesar de que algunas características dinámicas de las estructuras tipo, hayan cumplido. En lo referente al área de cimentación total para los 3, 4 y 5 niveles es de 361 m², pero al considerar las zapatas aisladas, se tendrán unas áreas en ocupación de 59.53% en 3 niveles, 81.43% en 4 niveles y 89% en 5 niveles, respecto al área de cimentación total. Es decir, se deja enmarcado que, para futuras investigaciones, se podría trabajar con otros tipos de cimentación como platea de cimentación o pilotes, para que las estructuras tengan un comportamiento favorable ante demandas sísmicas en lo antes mencionado.

Referencias

1. Aguiar, R., & Ortiz, D. (2017). Analisis sismico de un edificio de 12 pisos de la ciudad de manta considerando interacción suelo estructura. *Revista Internacional de Ingeniería De Estructuras.*, 22(3), 251–279. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.24133/riie.v22i3.646>
2. ASCE. (2017). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings*. ASCE/SEI 41-17, Reston, Virginia.
3. Butchibabu, B., Jha, P. C., Sandeep, N., & Sivaram, Y. V. (2023). Seismic refraction tomography using underwater and land based seismic data for evaluation of foundation of civil structures. *Journal of Applied Geophysics*, 210, 104934. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.104934>
4. Forcellini, D. (2021). Analytical fragility curves of shallow-founded structures subjected to Soil-Structure Interaction (SSI) effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141, 10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106487>
5. Gallegos Ortiz, B. (2015). Interaccion suelo estructura de Edificios, según Asce-10 y la guía Nerph-Nist-2012. 1, 3–4. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26875.77608>
6. González Acosta, J. L., Vardon, P. J., & Hicks, M. A. (2021). Study of landslides and soil-structure interaction problems using the implicit material point method. *Engineering Geology*, 285. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106043>
7. Hakam, A., & Suhelmidawati, E. (2013). Liquefaction Due to September 30th 2009 Earthquake in Padang. *Procedia Engineering*, 54, 140–146. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.013>
8. Jiménez, C., Saavedra J., M., & Moreno, N. (2021). Seismic source characteristics of the 2016 Pedernales-Ecuador earthquake (Mw 7.8). *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 312, 106670. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pepi.2021.106670>
9. Li, M., Lu, X., Lu, X., & Ye, L. (2014). Influence of soil–structure interaction on seismic collapse resistance of super-tall buildings. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(5), 477–485. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.04.006>
10. Maquera, P. (2018). Isovalores de capacidad admisible del suelo para cimentaciones superficiales en el Sector Siete del Distrito Alto de la Alianza. *REVISTA VERITAS ET SCIENTIA - UPT*, 7(1), 848–858. <https://doi.org/https://doi.org/10.47796/ves.v7i1.14>

11. NEC. (2015). “PELIGRO SÍSMICO DISEÑO SISMO RESISTENTE”. Quito, Ecuador: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.
12. NEC-SE-GC. (2015). Norma Ecuatoriana de la Construcción, Geotecnia y Cimentaciones [Ecuadorian Construction, Geotechnics and Foundations Standard]. Recuperado de <https://online.portoviejo.gob.ec/docs/nec6.pdf>
13. NEHRP-NIST GCR 12-917-21,(2012), Soil-Structure Interaction Building Structures, Engineering Laboratory of the National Institute of Standards and Technology, Maryland.
14. Papadopoulos, M., Beeumen, R. Van, François, S., Degrande, G., & Lombaert, G. (2017). Computing the modal characteristics of structures considering soil-structure interaction effects. *Procedia Engineering*, 199, 2414–2419. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.296>
15. Ruiz García, J., & Guerrero, H. (2017). Estimation of residual displacement ratios for simple structures built on soft-soil sites. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 100, 555–558. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.07.008>
16. Kleemann, J., Koo, H., Hensen, I., Mendieta-Leiva, G., Kahnt, B., Kurze, C., Inclan, D. J., Cuenca, P., Noh, J. K., Hoffmann, M. H., Factos, A., Lehnert, M., Lozano, P., & Fürst, C. (2022). Priorities of action and research for the protection of biodiversity and ecosystem services in continental Ecuador. *Biological Conservation*, 265, 109404. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109404>
17. Vicencio, F., & Alexander, N. A. (2021). Method to evaluate the dynamic structure-soil-structure interaction of 3-D buildings arrangement due to seismic excitation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106494>
18. Villarreal G., Cerna M., Espinoza C. (2021). Interacción sísmica sueloestructura en edificaciones con muros de ductilidad limitada sobre plateas de cimentación. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 26 (1),153-178
19. Villareal, G. (2020). Interacción suelo-estructura en edificaciones con zapatas aisladas. *Revista Internacional de Ingeniería De Estructuras.*, 25(3), 311–332.
20. Vargas, Y. F., Pujades, L. G., Barbat, A. H., & Hurtado, J. E. (2013). Evaluación probabilista de la capacidad, fragilidad y daño sísmico de edificios de hormigón armado. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 29(2), 63–78. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rimni.2013.04.003>

Interacción Suelo – Estructura para edificaciones de hormigón armado, mediante modelos dinámicos

21. Wani, F. M., Vemuri, J., Rajaram, C., & Babu R, D. V. (2022). Effect of soil structure interaction on the dynamic response of reinforced concrete structures. *Natural Hazards Research*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nhres.2022.11.002>

©2023 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).|