

SEISMIC INTERACTION OF SOIL-STRUCTURE IN BUILDINGS WITH LIMITED DUCTILITY WALLS ON FOUNDATION PLATES

Genner Alvarito Villarreal Castro⁽¹⁾, Marco Antonio Cerna Vasquez⁽²⁾, Cesar Ubaldo Espinoza Torres⁽³⁾

⁽¹⁾ Doctor (Ph.D) en Ingeniería Sismorresistente, Profesor Extraordinario, Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Campus Trujillo. Calle 31 s/n Urb. San Isidro 2da Etapa, Trujillo, Perú. Correo: genner.villarreal@upn.pe

⁽²⁾ Profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Campus Trujillo. Calle 31 s/n Urb. San Isidro 2da Etapa, Trujillo, Perú. Correo: marco.cerna@upn.pe

⁽³⁾ Project Controls Manager, Skanska, Estados Unidos. Correo: cuet16@hotmail.com

Received: April 2020. Accepted: February 2021.

Published: March 2021.

ABSTRACT

This investigation is directed to the calculation of buildings with limited ductility walls, considering of the base foundation flexibility, known worldwide as soil- structure interaction. For the development of this research, we manage different models proposed by different researches in the matter of Structural and Geotechnical Engineering.

The soil-structure interaction models studied in this research, were based in different researches published by Ph.D. Genner Villarreal Castro, which reflected extensive knowledge and theories about this area of seismic investigation, taking main consideration that the structures must have the required knowledge of the country.

In this investigation development, the most competent dynamic models on plates foundation were chosen, considering the flexibility and the physical – mechanical properties of soil. Similarly developed a building modeling methodology was developed with ductility walls on foundation plates in front of seismic action with various angles of inclination and under conditions of Peru , according to requirements of the seismic design standard E030.

Finally, the analysis and structural design of the study building were done. In these topics, different points were developed. Such a structural requirements, stiffness and mass center seismic analysis of the building, criteria of structural modeling, application of the SAP program and design of structural elements.

Keywords: Interaction, Soil-Structure, Foundation Plates, Ductility Walls

INTERACCION SISMICA SUELO-ESTRUCTURA EN EDIFICACIONES CON MUROS DE DUCTILIDAD LIMITADA SOBRE PLATEAS DE CIMENTACION

RESUMEN

La presente investigación, está orientada al cálculo de edificaciones con muros de ductilidad limitada, considerando la flexibilidad de la base de fundación, conocida a nivel mundial, como Interacción Suelo-Estructura. Para el desarrollo de esta investigación, se manejaron diferentes modelos propuestos por diversos científicos investigadores en el campo de la Ingeniería Estructural y Geotécnica.

Los modelos de interacción suelo-estructura estudiados en el presente trabajo de investigación, tuvieron como base las diversas investigaciones publicadas por el Ph.D Genner Villarreal Castro, en donde se reflejan amplios conocimientos y teorías acerca de esta área de la investigación sísmica, teniendo la consideración principal que las estructuras deben de cumplir con los requerimientos exigidos en el país.

En el desarrollo de la investigación, se eligieron los modelos más adecuados para plateas de cimentación, considerando la flexibilidad y las propiedades físico-mecánicas del suelo. De igual forma, se desarrolló una metodología de modelación del edificio con muros de ductilidad sobre plateas de cimentación, ante la acción sísmica con diversos ángulos de inclinación y en condiciones reales del Perú, según los requerimientos de la norma de Diseño Sismorresistente E030.

Finalmente, se desarrolló el análisis y diseño estructural de la edificación en estudio. En estos tópicos, se desarrollaron diversos puntos como requisitos estructurales, centros de rigidez y masa, análisis sísmico de la edificación, criterios del modelamiento estructural, aplicación del programa SAP2000 y diseño de elementos estructurales.

Palabras clave: Interacción, Suelo-Estructura, Platea de Cimentación, Muros de Ductilidad.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos, el problema de interacción suelo-estructura, ha sido estudiado de manera muy importante en el campo de la Ingeniería Civil. En una interpretación más generalizada, este problema puede ser formulado como un contacto dinámico entre la base y la estructura (Villarreal, 2006).

Cabe resaltar que en la actualidad este problema aún está lejos de su verdadera formulación, ya que los modelos matemáticos y físicos aún tienen un sinnúmero de espectros no determinados, ni modelados y en consecuencia, es un campo abierto para los investigadores.

El efecto de la interacción suelo-estructura es de mucha importancia, porque en el análisis y diseño estructural, ningún edificio podría aislarse del suelo de fundación. Cabe resaltar, su influencia en la determinación de los modos de vibración y la distribución de los esfuerzos en el edificio y la

cimentación. Por lo cual, el suelo de fundación no debe considerarse como un valor, sino estudiarse en un comportamiento integral con el edificio.

En el Perú, específicamente en la ciudad de Trujillo, las construcciones con el sistema de muros de ductilidad limitada se han incrementado de manera vertiginosa, en consecuencia, la seguridad estructural tiene un valor importante y decisivo en el desarrollo del país y de esta ciudad. La razón fundamental en la solución de este problema es la elaboración de metodologías de cálculo sísmico de edificios que reflejen las fuerzas y esfuerzos reales para un diseño estructural confiable y seguro.

A través del programa SAP2000, se puede modelar la estructura, así como analizar los modelos dinámicos de interacción suelo-estructura, relacionados con determinados parámetros de rigidez de la cimentación, que se determinan en base a investigaciones o procesos teórico-experimentales, que consideran las características de la acción sísmica.

2. ESTADO DEL ARTE

De acuerdo al problema de interacción suelo-estructura expuesto, se muestra que la formulación tradicional del cálculo de edificaciones, considerando el empotramiento perfecto de las columnas con la cimentación, nos lleva a la necesidad de una descripción más detallada de las condiciones de fijación de los apoyos de la edificación, esto es, a una formulación correcta de las condiciones de frontera, si se habla acerca de la formulación del problema de cálculo de la edificación dentro del campo de la mecánica de cuerpo sólido.

Se debe realizar un estudio preciso de la edificación, ya que el suelo de fundación tiene una gran participación en el comportamiento integral de la superestructura y subestructura, siendo necesario un estudio de la interacción dinámica suelo-estructura.

Para el caso de plateas de cimentación, analizaremos los modelos de Winkler E. (1867), Pasternak P.L. (1954), Barkan D.D. - Savinov O.A. (1948) y la Norma Rusa SNIP 2.02.05-87 (1987), los cuales son aplicados para este tipo de cimentación.

2.1. Modelo de Winkler E.

Se basa en el cálculo de cimentaciones, considerando el módulo de balasto C_1 (T/m²/m) a la compresión, llamado por algunos autores como módulo de subrasante y se calcula tanto en forma experimental, como analíticamente (Villarreal, 2006).

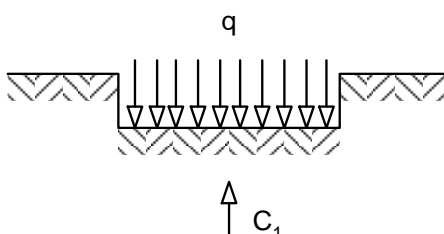


Figura 1 Modelo de Winkler E.

- Solo un estrato de suelo:

$$C_1 = \frac{E_1}{h_1(1-2v_1^2)} \quad (1)$$

- Para dos estratos de suelo:

$$C_2 = \frac{1}{\frac{h_1(1-2v_1^2)}{E_1} + \frac{h_2(1-2v_2^2)}{E_2}} \quad (2)$$

Siendo:

E_1, E_2 - Módulos de Young de los estratos 1 y 2.

v_1, v_2 - Módulos de Poisson de los estratos 1 y 2.

h_1, h_2 - Espesor de los estratos 1 y 2

2.2. Modelo de Pasternak P.L.

Es la perfección del modelo de Winkler E. y se basa fundamentalmente en el uso de dos coeficientes C_1 (T/m²/m) y C_2 (T/m), siendo C_1 el que describe a compresión del suelo y C_2 describe el trabajo del suelo en los límites o bordes de la cimentación (Villarreal, 2006).

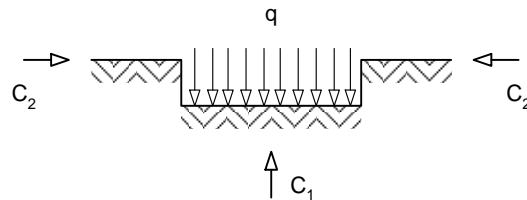


Figura 2 Modelo de Pasternak P.L.

- Solo un estrato de suelo:

$$C_1 = \frac{E_1}{h_1(1-2v_1^2)} \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{E_1 h_1}{6(1-v_1)} \quad (4)$$

- Para dos estratos de suelo:

$$C_1 = \frac{E_1}{\frac{h_1(1-2v_1^2)}{E_1} + \frac{h_2(1-2v_2^2)}{E_2}} \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{1}{6(1+\varepsilon_2)} \left[\frac{E_1 h_1}{(1+v_1)} (3 + 3\varepsilon_2 + \varepsilon_2^2) + \frac{E_2 h_2}{(1+v_2)} \right] \quad (6)$$

2.3. Modelo de Barkan D.D. – Savinov O.A.

El modelo dinámico de D.D. Barkan - O.A. Savinov es teórico-experimental, basado en la interacción de la cimentación con la base de fundación en forma de proceso establecido de vibraciones forzadas.

Para determinar los coeficientes de rigidez de la cimentación, el científico Barkan D.D. propuso colocarlas en función de los coeficientes de compresión y desplazamiento elástico que operan sobre una inercia y un área respectivamente. Solo se calculan cinco coeficientes de rigidez de los seis grados de libertad existentes, debido a que en este modelo se restringe el giro en el eje "z" (Villarreal, 2006), según las siguientes fórmulas:

$$K_x = C_x x A \quad (7)$$

$$K_y = C_y x A \quad (8)$$

$$K_z = C_z x A \quad (9)$$

$$K_{\varphi,x} = C_{\varphi,x} x I_x \quad (10)$$

$$K_{\varphi,y} = C_{\varphi,y} x I_y \quad (11)$$

Donde:

C_x, C_y, C_z = Coeficiente de desplazamiento elástico uniforme

C_z, C_φ = Coeficientes de compresión elástica uniforme y no uniforme;

A = Área de la base de la cimentación;

I_x, I_y, I_z = Momento de inercia de la base de la cimentación respecto al eje principal, perpendicular al plano de vibración.

Según diversas investigaciones realizadas, se han obtenido las siguientes expresiones, como resultado los coeficientes de desplazamiento y de compresión elástica, para el modelo Barkan D.D. – Savinov O.A.

$$C_x = D_o \left[1 + \frac{2(a+b)}{\Delta.A} \right] \sqrt{\frac{\rho}{\rho_o}} \quad (12)$$

$$C_y = D_o \left[1 + \frac{2(a+b)}{\Delta.A} \right] \sqrt{\frac{\rho}{\rho_o}} \quad (13)$$

$$C_z = D_o \left[1 + \frac{2(a+b)}{\Delta.A} \right] \sqrt{\frac{\rho}{\rho_o}} \quad (14)$$

$$C_{\varphi,x} = C_o \left[1 + \frac{2(a+3b)}{\Delta A} \right] \sqrt{\frac{\rho}{\rho_o}} \quad (15)$$

$$C_{\varphi,y} = C_o \left[1 + \frac{2(3a+b)}{\Delta A} \right] \sqrt{\frac{\rho}{\rho_o}} \quad (16)$$

Donde:

C_o, D_o = Coeficientes determinados a través de ensayo experimental.

a, b = Dimensiones de la cimentación en el plano.

Δ = Coeficiente empírico, asumido para cálculos prácticos $\Delta = 1\text{m}^{-1}$.

Para el coeficiente D_o , como se mostraron en las investigaciones de Barkan D.D. se puede utilizar la dependencia empírica:

$$D_o = \frac{1-\nu}{1-0.5\nu} * C_o \quad (17)$$

El valor de C_o cuando $\rho_o = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ estará en función de acuerdo al tipo de suelo de la base de fundación, a través de la tabla 1 (Villarreal, 2006).

Tabla 1 Coeficiente C_o

PERFIL	BASE DE FUNDACIÓN	SUELO	C_o (kg/cm^3)
S1	Roca o suelo muy rígido	Arcilla y arena arcillosa dura ($I_L < 0$)	3.0
		Arena compacta ($I_L < 0$)	2.2
		Cascajo, grava, canto rodado, arena densa.	2.6
S2	Suelo intermedio	Arcilla y arena arcillosa plástica ($0.25 < I_L < 0.5$)	2.0
		Arena plástica ($0 < I_L < 0.5$)	1.6
		Arena polvorosa medio densa y densa ($e < 0.80$)	1.4
		Arena de grano fino, mediano y grueso independiente de su densidad y humedad	1.8
S3	Suelo flexible o con estratos de gran espesor	Arcilla y arena arcillosa de baja plasticidad ($0.5 < I_L < 0.75$)	0.8
		Arena plástica ($0.5 < I_L < 1$)	1.0
		Arena polvorosa, saturada, porosa ($e > 0.80$)	1.2
S4	Condiciones excepcionales	Arcilla y arena arcillosa muy blanda ($I_L > 0.75$)	0.6
		Arena movediza ($I_L > 1$)	0.6

2.4. Modelo de la Norma Rusa

Este modelo considera 6 grados de libertad de la interacción suelo-estructura. Los coeficientes de rigidez de compresión elástica uniforme K_z ; desplazamiento elástico uniforme K_x ; compresión elástica no uniforme K_φ ; desplazamiento elástico no uniforme K_ψ ; se pueden determinar usando las siguientes fórmulas:

$$K_z = C_z A \tag{18}$$

$$K_x = C_x A \tag{19}$$

$$K_\varphi = C_\varphi A \tag{20}$$

$$K_\psi = C_\psi A \tag{21}$$

Donde:

- A = Área de la Base de la Fundación.
- C_x = Coeficiente de desplazamiento elástico uniforme en X.
- C_y = Coeficiente de desplazamiento elástico uniforme en Y.
- C_z = Coeficiente de compresión elástica uniforme.
- C_φ = Coeficiente de compresión elástica no uniforme.
- C_ψ = Coeficiente de desplazamiento elástico no uniforme.

Los coeficientes de desplazamiento elástico uniforme, compresión elástica no uniforme y el de desplazamiento elástico no uniforme, se determinan por las siguientes fórmulas:

$$C_x = C_y = 0.7C_z \tag{22}$$

$$C_\varphi = 2C_z \tag{23}$$

$$C_\psi = C_z \tag{24}$$

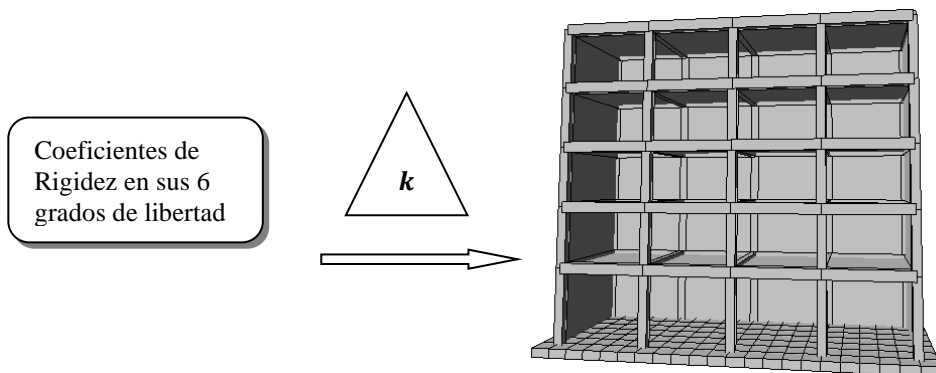


Figura 3. Modelo de la Norma Rusa.

3. EDIFICIO EN ESTUDIO

3.1. Características generales de los edificios

Las edificaciones del Complejo Residencial Yahuar Huaca- Baños del Inca, se encuentran ubicados en el Jirón Yahuar Huaca N° 650 - 656, de la zona correspondiente al distrito de Baños del Inca, provincia de Cajamarca, departamento de Cajamarca, en el norte del Perú.

El conjunto residencial consta de 8 bloques de viviendas multifamiliares de cinco niveles cada una, con dos tipologías de módulos multifamiliares, una en el que se desarrollan 2 departamentos por nivel (Módulo Tipo A) y la otra en la que se desarrollan 4 departamentos por nivel (Módulo Tipo B), las mismas que al ser viviendas básicas, cada departamento no excede los 80.00m², pero pese al área se ha tenido como prioridad el aprovechamiento del espacio, sin perder la calidad arquitectónica, tanto en lo que a diversificación de ambientes se refiere, así como a los aspectos tecnológicos de iluminación y ventilación de los ambientes.

El módulo elegido para el desarrollo de la presente investigación es el tipo B, el mismo que consta de 4 departamentos por nivel, de 79.86m² de área techada a excepción del primer nivel donde se tienen dos departamentos de 76.04m² y los dos restantes de 79.86m², esto debido al pasaje de acceso común para los demás departamentos.

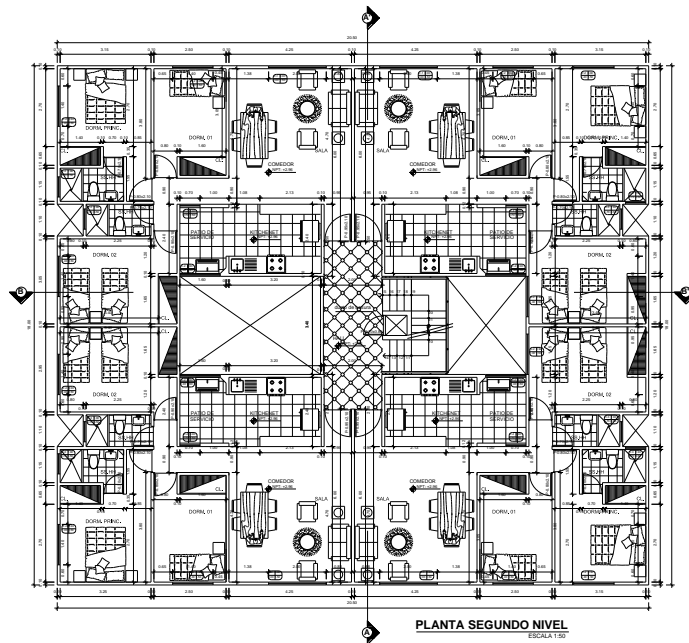


Figura 4. Planta típica.

En todos los casos, para la parte de la cimentación se consideró concreto con una resistencia a compresión (f'_c) de 175 kg/cm², en cambio para

la superestructura es 210 kg/cm^2 . En lo que corresponde al acero de refuerzo con esfuerzo de fluencia de 4200 kg/cm^2 .



Figura 5. Esquema del edificio.

En lo que corresponde al estudio de mecánica de suelos, se tiene como tipo de suelo una arena arcillosa, presión admisible que asciende a $q_a = 1.65 \text{ kg/cm}^2$ y una agresividad de suelo correspondiente a moderada cantidad de sales solubles. Cabe resaltar que el estudio de mecánica de suelos recomienda un mejoramiento de terreno con material seleccionado o afirmado de 50cm, sin embargo no está demás indicar que este mejoramiento es un simple acondicionador para cimentación (platea), ya que no contribuye a la capacidad portante del terreno.

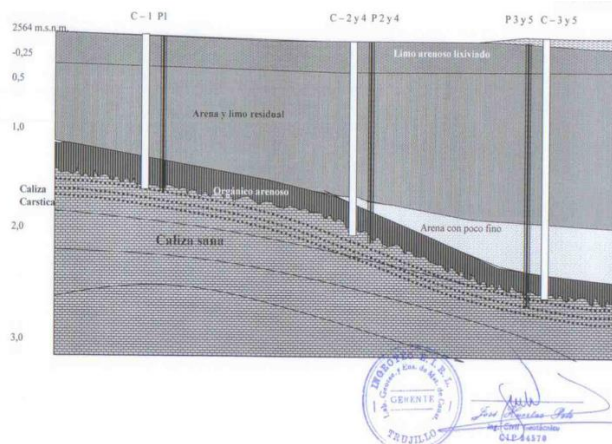


Figura 6. Perfil Estratigráfico del Suelo de Fundación.

3.2. Cálculo Sísmico

El estudio del análisis sísmico se realizará mediante las disposiciones de la Norma Técnica de Edificaciones E030 de Diseño Sismorresistente. El edificio se clasifica como regular en planta y regular en altura. De igual forma,

este se clasifica como una edificación común (vivienda), en la cual deberá tomarse en cuenta un 25% de la carga viva para el análisis estático.

En cuanto al análisis dinámico, se realizará considerando la idealización de la estructura a base de masas y resortes que nos permitirá determinar el desplazamiento lateral en cada dirección y el período del edificio. Para nuestro caso, usaremos el procedimiento de análisis espectral y el análisis tiempo-historia.

El soporte informático a utilizarse es el programa SAP2000, con el cual se hará un análisis tridimensional considerando diafragmas rígidos en cada nivel. Cada diafragma tendrá tres grados de libertad, dos traslacionales y un giro en planta ubicados en su respectivo centro de masas, el cual según la Norma de Diseño Sismorresistente E030, será afectado por el 5% de excentricidad accidental. En cuanto al modelado de la estructura, los muros de ductilidad limitada se considerarán el uso de los Elementos Shell, el cual es una formulación de tres o cuatro nodos que combina el comportamiento de membrana y de lámina. El programa en mención, considera deformaciones por flexión, corte y carga axial.

En la proyección de edificaciones sismorresistentes, el cálculo con el uso de acelerogramas es el más trabajoso. En este artículo, para el análisis tiempo-historia, se utilizaron los acelerogramas de Lima (03.10.1974) e Ica (15.08.2007), todos con el mismo perfil de suelo del proyecto, es por ello, que solo se consideraron los dos acelerogramas reales existentes.

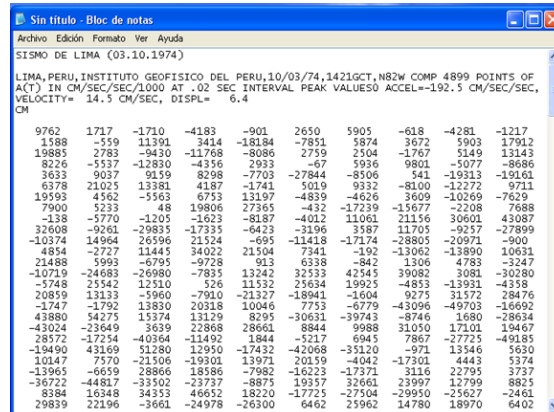


Figura 7. Acelerograma de Lima (03.10.1974)

MODELO DINÁMICO BARKAN D.D – SAVINOV O.A.

Para el cálculo de los coeficientes de rigidez para la edificación en estudio, el valor total del coeficiente se dividió en partes, distribuidos equitativamente en cuatro áreas, teniendo en consideración el metrado de cargas que soporta cada área. En los siguientes cuadros se presentan los cálculos realizados para el Área 1.

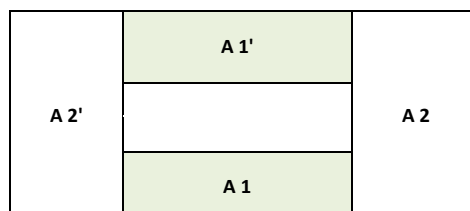
Tabla 2 Características de la edificación

CARACTERÍSTICAS DE LA EDIFICACIÓN			
<i>Módulo de Elasticidad del Concreto</i>	E_c	198431.35	kg/cm ²
<i>Peso Específico del Concreto</i>	γ_c	2400	kg/m ³
<i>Coefficiente de Poisson del Concreto</i>	ν_c	0.2	---
<i>Área de la Edificación de cada Entrepiso</i>	A_e	87.6	m ²
	A_e	876000	cm ²
<i>Dimensiones en Planta</i>	a	12.00	m
	b	7.30	m

CARACTERÍSTICAS DEL SUELO DE FUNDACIÓN			
<i>Tipo de Suelo</i>	Arena Arcillo Limosa		
<i>Módulo de Elasticidad del Suelo</i>	E_s	155	kg/cm ²
<i>Densidad del Suelo</i>	γ_s	1.6	gr/cm ³
<i>Coefficiente Poisson del Suelo</i>	μ_s	0.3	--
<i>Angulo de Fricción Interna del Suelo</i>	Φ	26	--

PESO POR NIVELES	
Niveles	Peso de Entrepisos (T)
5	48.05
4	69.97
3	69.97
2	69.97
1	49.75

Gráfico explicativo:



DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE RIGIDEZ

Coeficiente C_o :	C_o	0.8	kg/cm^3
Presión estática del Suelo :	ρ	0.3513	kg/cm^2
Dato Adicional :	ρ_o	0.2000	kg/cm^2
Cálculo de D_o :	D_o	0.6588	kg/cm^3
Dato Adicional:	Δ	0.01	

DETERMINACIÓN DE LA INERCIA

Se procedió a obtener los momentos de inercia a cada eje (m^4) de todo el edificio.

Tabla 3 Momentos de inercia de cada eje.

CÁLCULO DE INERCIA	
I_x	2877.21
I_y	1070.20
I_z	4030.78

DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE COMPRESIÓN Y DESPLAZAMIENTO

Los coeficientes de Compresión y Desplazamiento operan sobre una inercia y una área respectivamente.

Tabla 4 Momentos de inercia de cada eje.

COEFICIENTES DE COMPRESIÓN Y DESPLAZAMIENTO		
Coef. Rigidez	kg/cm^3	T/m^3
C_x	1.257832	1257.832
C_y	1.257832	1257.832
C_z	1.527368	1527.367
$C_{\varphi x}$	1.880768	1880.768
$C_{\varphi y}$	2.108300	2108.300

DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE RIGIDEZ

Mediante la obtención de los coeficientes de Compresión y Desplazamiento se determinarán los cálculos de los coeficientes de rigidez.

Tabla 5 Coeficientes de rigidez

COEFICIENTES DE RIGIDEZ		
K_x	110186.098	T/m
K_y	110186.098	T/m
K_z	133797.405	T/m
$K_{\varphi x}$	164755.283	T.m
$K_{\varphi y}$	184687.068	T.m

MODELO DINÁMICO NORMA RUSA SNIP 2.02.05-87**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE b_0**

En la tabla, según el tipo de suelo, obtenemos el Coeficiente b_0 , para así poder determinar C_z .

Tabla 6 Coeficientes b_0 de acuerdo al tipo de suelo.

Tipo de Suelo	b_0 (m^{-1})
Suelos Arenosos	1
Arenas Arcillosas	1.2
Arcillas, Gravas,Cantos Arenas Densas	1.5

Debido al estudio de suelos realizado, los primeros valores a usarse son:

b_0	$1.2m^{-1}$
A_{10}	$10m^2$

DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE COMPRESIÓN Y DESPLAZAMIENTO

COEFICIENTE DE COMPRESIÓN ELÁSTICA UNIFORME

La principal característica elástica de la cimentación, es decir el coeficiente de compresión elástica uniforme, se determina por medio de ensayos experimentales. De igual forma, este coeficiente se puede determinar por la fórmula indicada por el Ph.D. Genner Villarreal Castro en su Libro *Interacción Sísmica Suelo-Estructura en Edificaciones con Plateas de Cimentación* (2017)

C_z	2488.435	T/m ³
-------	----------	------------------

COEFICIENTES C_x , C_φ , C_ψ

Se muestra los coeficientes de desplazamiento elástico uniforme y no uniforme, así como, el coeficiente de desplazamiento elástico no uniforme.

Tabla 7 Coeficientes de desplazamiento elástico uniforme y no uniforme.

C_x	1741.905	T/m ³
C_y	1741.905	T/m ³
$C_{\varphi x}$	4976.871	T/m ³
$C_{\varphi y}$	4976.871	T/m ³
C_ψ	2488.435	T/m ³

DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE RIGIDEZ

Mediante la obtención de los coeficientes de Compresión y Desplazamiento se obtendrán los cálculos de los coeficientes de rigidez.

Tabla 8 Coeficientes de rigidez determinados

COEFICIENTES DE RIGIDEZ		
K_x	152590.881	T/m
K_y	152590.881	T/m
K_z	217986.973	T/m
$K_{\varphi x}$	435973.945	T.m
$K_{\varphi y}$	435973.945	T.m
$K_{\psi z}$	217986.973	T.m

3.3. Modelamiento en el SAP2000

La estructura se modeló mediante elementos finitos tipo Shell, los cuales fueron divididos en elementos de un tamaño de 0.50m x 0.50m, para lograr una mejor distribución de los esfuerzos resultantes, es importante mencionar que las propiedades de los materiales y dimensiones de las secciones tentativas se consideraron de acuerdo a lo especificado por la Norma Peruana E030 para el análisis y diseño de EMDL.

Se realizaron 12 modelos del edificio: modelo convencional, modelo de Winkler, modelo de Pasternak, modelo de Barkan y modelo de la Norma Rusa, en cada uno de ellos se realizaron los análisis Estático, Espectral y Tiempo-Historia.

Se ubicaron los centros de masa de cada entrepiso y se les asignó las masas traslacionales y rotacionales en cada grado de libertad, de manera similar se procedió para la platea, pero en esta se consideraron 6 grados de libertad. Se muestra en la imagen la vista 3D del edificio con los centros de masas.

Se realizaron las combinaciones de carga para cada modelo como se muestra en las figuras:

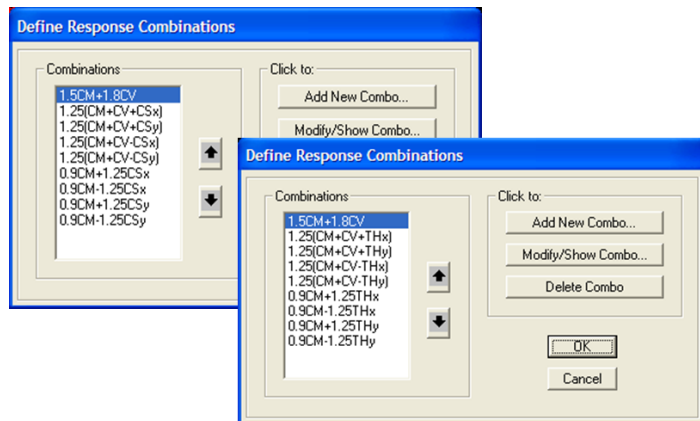


Figura 8. Definición de Combinaciones.

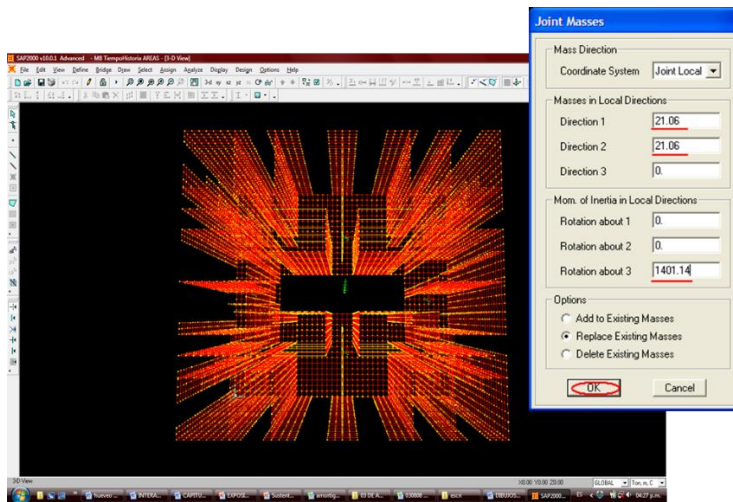


Figura 9. Asignación de masas.

Para representar la interacción suelo-estructura en la platea de cimentación modelada con elementos Shells de 0.50m x 0.50m, de tal manera, que la discretización permita enlazar nudo discretizado de cimentación con nudo discretizado del muro y se le asignó una elevada rigidez a la platea para considerar un comportamiento semi-rígido. En cuanto a la asignación de los coeficientes de rigidez se procedió a dividir la cimentación en 4 áreas, a las cuales se les asignó un coeficiente de rigidez proporcional a las cargas actuantes en cada una de estas áreas, en la imagen se muestran los coeficientes de rigidez asignados para el modelo de la Norma Rusa, considerando los 6 grados de libertad de la cimentación.

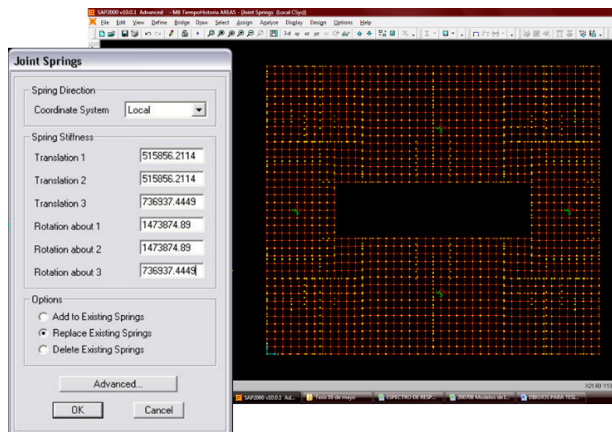


Figura 10. Asignación de Coeficientes.

Se obtuvieron los esfuerzos actuantes en los muros para todas las combinaciones de cargas, en este caso se muestran las fuerzas resultantes F22.

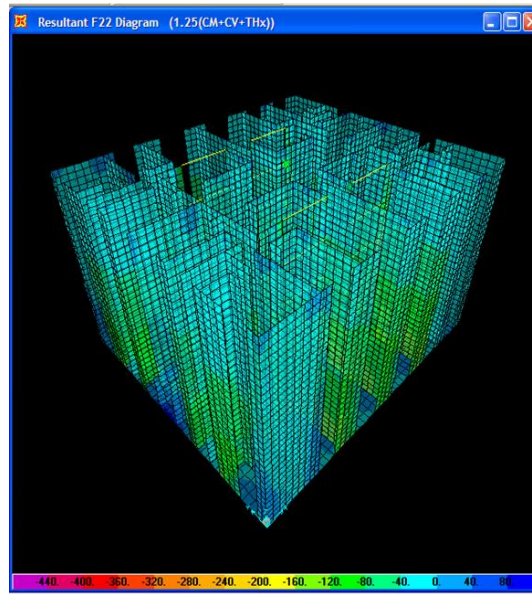


Figura 11. Esfuerzos obtenidos en los muros.

Finalmente para el cálculo de la platea de cimentación se empleó el modelo de Winkler, el cual brinda una distribución adecuada de los esfuerzos en toda el área de la cimentación, se puede observar que las concentraciones de esfuerzos se dan en las zonas de unión muro-platea, que es donde probablemente se tenga que colocar un mayor refuerzo por flexión.

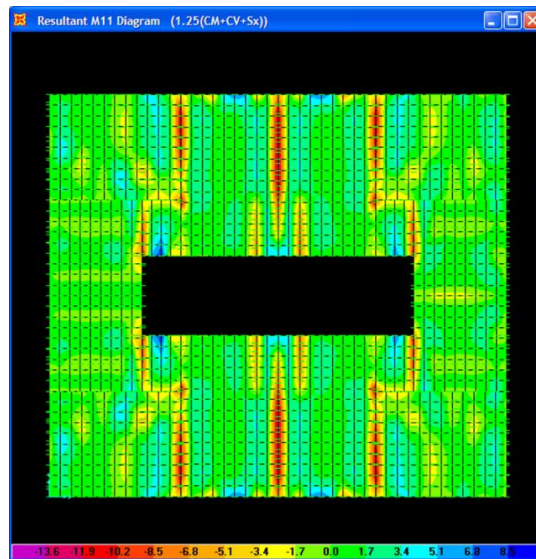


Figura 12. Esfuerzos obtenidos en la platea.

4. RESULTADOS

4.1. Períodos

En la figura 13, se muestra el gráfico de los períodos de vibración libre sin flexibilidad de la base de fundación y considerando la flexibilidad por los modelos dinámicos Barkan y Norma Rusa.

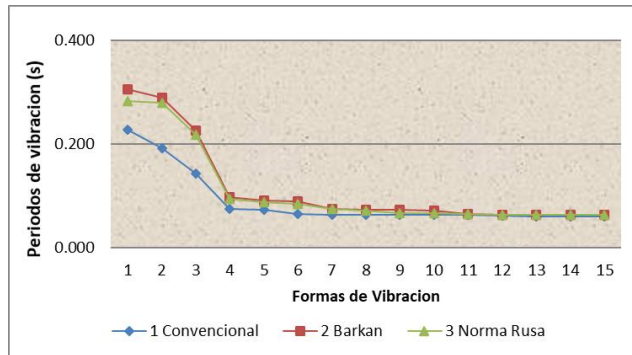


Figura 13. Períodos de las 15 primeras formas de vibración.

4.2. Desplazamientos

En la figuras 14 y 15, se muestran los desplazamientos máximos de los centros de masa en el Eje OX y Eje OY, bajo $\alpha=0^\circ$ y $\alpha=90^\circ$ de inclinación del sismo respectivamente. Cabe indicar que el mayor desplazamiento se presenta en el 5to piso.

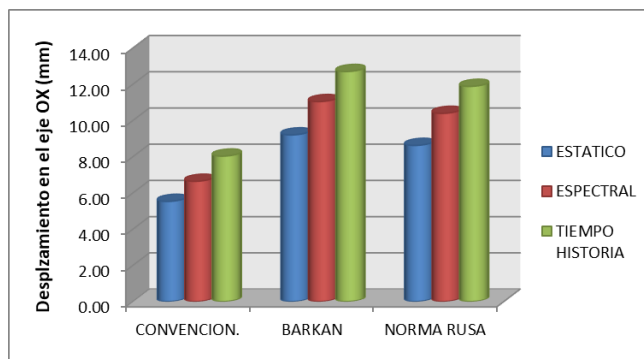


Figura 14. Desplazamientos Máximos en el eje OX, para $\alpha=0^\circ$

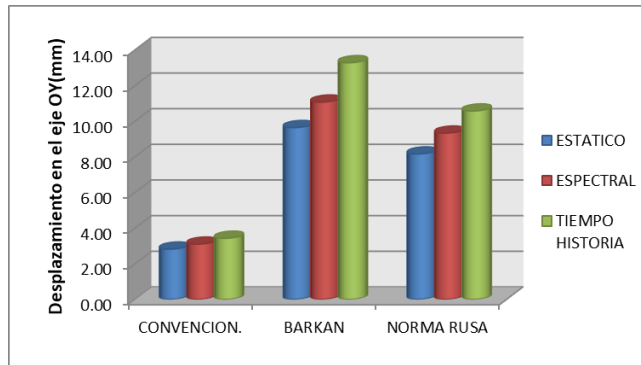


Figura 15. Desplazamientos Máximos en el eje OY, para $\alpha=90^\circ$

Como era de esperarse, la flexibilidad de la base de fundación incrementa los desplazamientos de los centros de masa en los ejes OX y OY, siendo más resaltante en el modelo de Barkan.

4.3. Axial, Cortante y Momento

En la figura 16, se muestran los resultados de la fuerza normal máxima, analizados por la Norma Peruana E030 con un $\alpha=0^\circ$ (Eje X), para los diversos modelos dinámicos y bajo distintos análisis sísmicos.

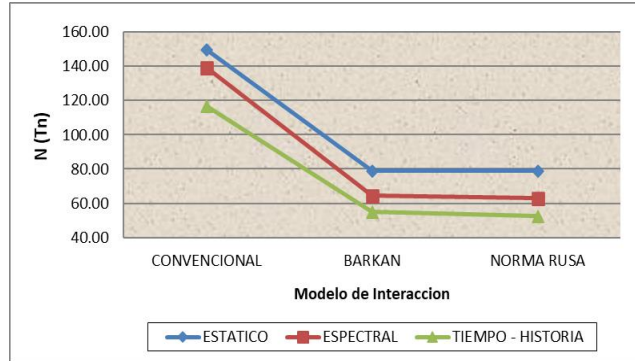


Figura 16. Fuerza Axial de Muro MX1

En la figura 17, se muestran los resultados de las fuerzas cortantes máximas calculados por el programa SAP2000 para la Norma Peruana E030 con un $\alpha=90^\circ$ (Eje Y), analizando los diversos modelos dinámicos y bajo distintos análisis sísmicos.

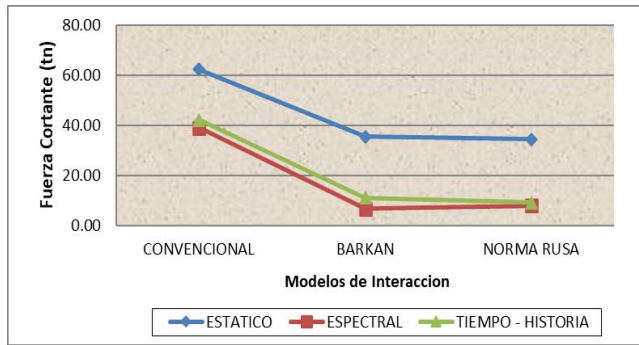


Figura 17. Fuerza Cortante de Muro MY15

En la figura 18, se muestran los resultados de las momentos flectores máximos, analizados por la Norma Peruana E030 con un $\alpha=0^\circ$ (Eje X), para los diversos modelos dinámicos y bajo distintos análisis sísmicos.

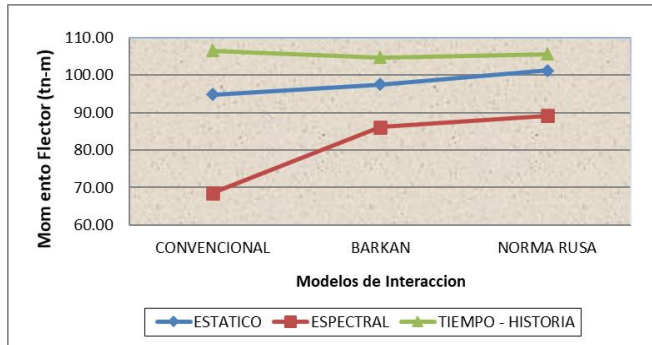


Figura 18. Momento Flector de Muro MX1.

Se puede observar que, los valores de la fuerza cortante para el análisis estático son los más considerables, pero también se afirma que, el análisis espectral da los menores valores. Se puede notar que, el modelo dinámico de la norma rusa, permite obtener mayores valores, tanto para el tiempo-historia, como para los análisis estático y espectral. Por otro lado, en cuanto a los momentos flectores, para el análisis tiempo-historia son los más considerables. De igual forma, se aprecia que mediante el modelo dinámico de la norma rusa, considerando la flexibilidad del suelo de fundación, se obtienen valores de momentos máximos.

4.4. Comparaciones Normativas

En la figura 19, se presentan los resultados de $X_{m\acute{a}x}$ calculados por el SAP2000 para la Norma Peruana E030, cuando $\alpha=0^\circ$ y bajo la acción de dos acelerogramas reales. Se puede notar de ambos sismos, que el de Lima (03.10.1974) permite obtener mayores valores de desplazamientos, tanto para el modelo común, como para los modelos de Barkan y Norma Rusa.

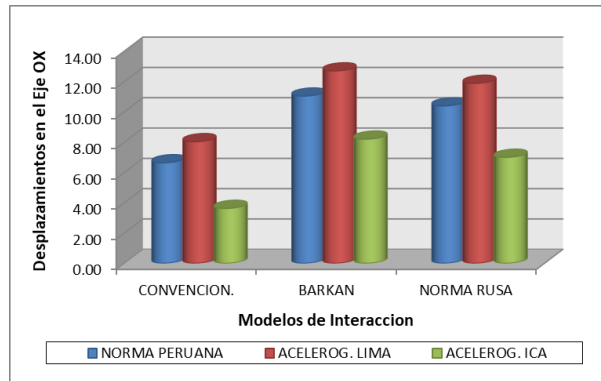


Figura 19. Desplazamiento máximo del centro de masas en el 5to piso en el eje OX.

En la figuras 20, 21 y 22, se muestran los valores de la fuerza cortante, momento flector y fuerza axial del modelo dinámico de la norma rusa, calculados por el programa SAP2000 y Norma Peruana E030, cuando $\alpha=0^\circ$ y bajo la acción de los acelerogramas de Lima (1974) e Ica (2007).

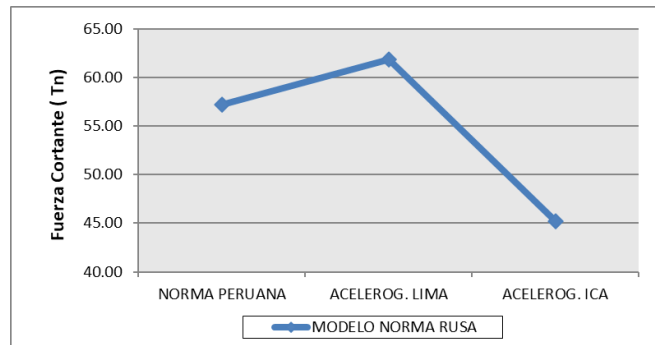


Figura 20. Fuerza Cortante por el modelo dinámico de la Norma Rusa.

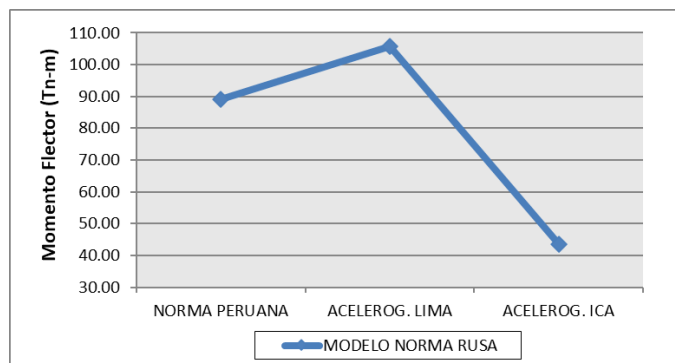


Figura 21. Momento Flector por el modelo dinámico de la Norma Rusa.

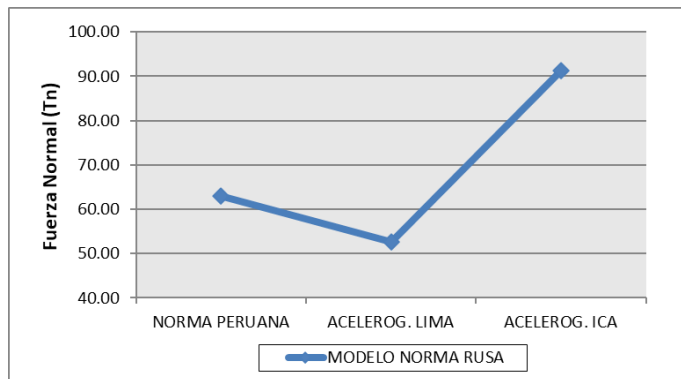


Figura 22. Fuerza Normal por el modelo dinámico de la Norma Rusa..

En lo que corresponde a fuerza cortante y momento flector, los mayores valores se dan para el acelerograma de Lima, mientras que para la fuerza axial, es el acelerograma de Ica.

4.5. Diseño Estructural

De acuerdo a los resultados obtenidos, usaremos el modelo de la Norma Rusa, ya que representa el comportamiento más próximo de la interacción suelo-estructura, en relación a los resultados presentados anteriormente.

La elección de la platea de cimentación es de 0.22 m, ya que no se presentan mayores problemas en los esfuerzos promedios en este elemento. Se debe indicar, que podríamos haber optado por una platea de 0.25m de espesor, pero tendríamos que considerar el aspecto económico, y al elegir una platea de dicho espesor el costo se incrementaría considerablemente. Razón por lo cual, el criterio económico también juega un rol importante al momento del diseño estructural.

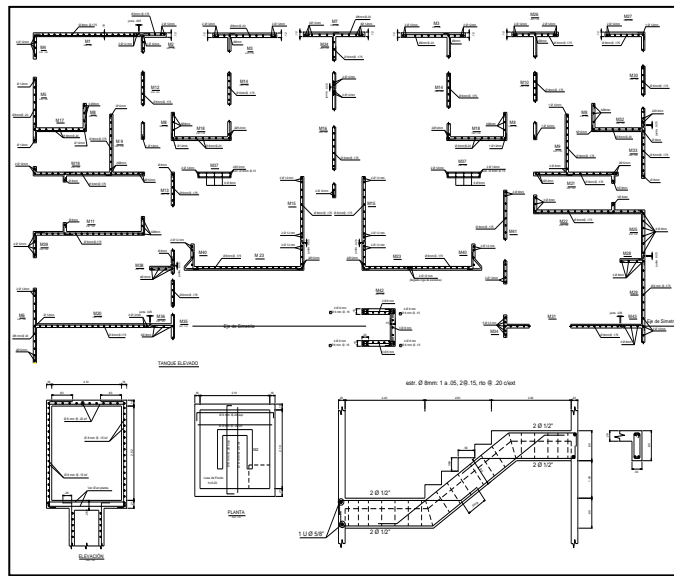


Figura 23. Plano de Muros Estructurales.

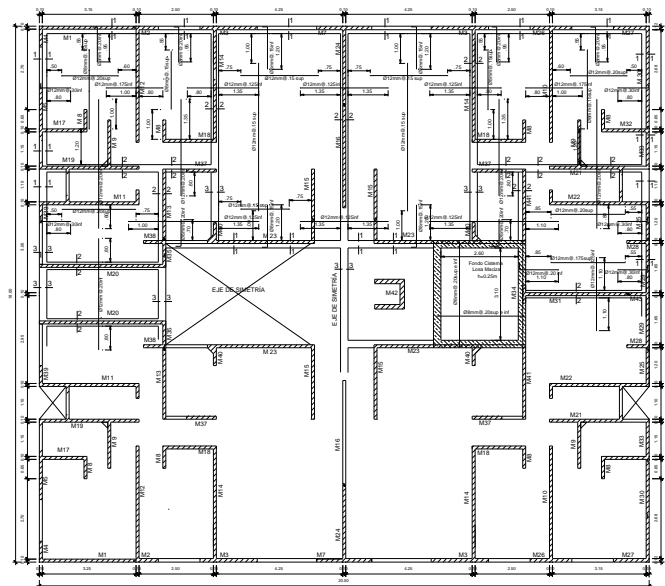


Figura 24. Plano de Cimentación.

5. CONCLUSIONES

Realizado y ejecutado el análisis y modelado de la estructura, mediante los modelos de interacción suelo-estructura con placa de cimentación para una edificación con muros de ductilidad limitada, se afirma que:

La interacción suelo estructura nos permite realizar un estudio más preciso del comportamiento del suelo de fundación con la edificación frente a eventos sísmicos reales, redistribuyendo los esfuerzos en los elementos estructurales de la edificación y la disipación de cierto porcentaje de energía inducida por un sismo.

A continuación se presenta, las conclusiones específicas, que nos llevaron a la conclusión final anteriormente descrita:

ANÁLISIS SÍSMICO

- a) El análisis Tiempo-Historia mediante el acelerograma de Ica (15.08.2007), no es muy confiable, ya que las aceleraciones registradas no son las reales, debiendo de escalarse al espectro de diseño.
- b) El acelerograma del sismo de Lima (31.10.1974), se usó para este estudio, ya que este presenta un sismo moderado con una aceleración de 1.925 m/s^2 . Cabe resaltar, que el sismo más intenso en el registro peruano es el de Lima de octubre de 1966 con una aceleración de 2.69 m/s^2 . No se tomó en consideración, en este estudio, porque su período de retorno es considerable comparado a la vida útil de la edificación haciendo un diseño antieconómico.
- c) Del análisis espectral por la Norma Peruana E030, se obtuvieron resultados muy por debajo de los obtenidos con el análisis tiempo-historia empleando los acelerogramas de Lima e Ica, se recomienda una microzonificación sísmica para incluir la gran cantidad y calidad de los suelos en el territorio nacional así como una revisión de los parámetros que definen la aceleración espectral (ZUCS).

INTERACCIÓN SÍSMICA SUELO-PLATEA DE CIMENTACIÓN-SUPERESTRUCTURA

- a) Considerar la interacción suelo-platea-superestructura, refleja de manera más aproximada el comportamiento real de una estructura y proporciona resultados más aproximados, lo cual fue discutido y aprobado en la Conferencia Internacional de Geotecnia realizada en San Petersburgo (2005).
- b) La comparación de los resultados de cálculo obtenidos, nos permite indicar que el mayor efecto de flexibilidad de la base de fundación se da en el modelo dinámico Barkan, pese a que este modelo restringe un grado de libertad que es la rotación en Z, siendo el modelo dinámico de la norma rusa, el que arroja un comportamiento intermedio entre el modelo convencional y el modelo de Barkan.
- c) Mediante el uso de los modelos dinámicos de interacción suelo – estructura nos permite indicar, que la flexibilidad de la base de fundación influye directamente en la determinación de los

parámetros de cálculo. El modelo considerando interacción suelo-estructura en comparación con un modelo empotrado permite que:

- ✓ Se incremente el primer período de vibración hasta un 24.67%.
 - ✓ Los desplazamientos laterales máximos de entrepisos aumenten un 35%. Estos desplazamientos cumplen con lo establecido en la Norma de Diseño Sismorresistente E030, dentro del límite para la distorsión de entrepisos para un edificio de material de concreto armado (0.007).
 - ✓ Se incrementaron los desplazamientos máximos del centro de masas en el eje OX hasta en 58.16 %, y en el eje OY hasta 53.12%.
 - ✓ Las fuerzas axiales máximas disminuyen en un 46%.
 - ✓ Las fuerzas cortantes máximas disminuyen en un 42%.
 - ✓ El momento flector disminuye en un 34%.
- d) La flexibilidad de la base de fundación bajo la acción de los acelerogramas de Lima (17.10.1966) e Ica (15.08.2007), incrementan los desplazamientos máximos del centro de masas en el eje OX hasta 20.93% y en el eje OY hasta 31.93%; incremento de las fuerzas cortantes máximas hasta 16%; incremento de las fuerzas axiales máximas hasta 25% y un incremento de los momentos flectores máximos hasta 20%, en comparación con el Análisis Espectral de la Norma Peruana.
- e) En la proyección de edificaciones antisísmicas, el cálculo con el uso de acelerogramas es el más trabajoso, otorgando los resultados más seguros para la determinación de las reacciones sísmicas de la edificación.

DISEÑO ESTRUCTURAL

- a) Se propone muros de 10 cm de espesor, salvo los muros perimetrales de 12 cm, así como una losa maciza bidireccional de 13 cm, y una platea de cimentación de 22 cm de espesor, para un suelo flexible S3, considerando la interacción suelo-estructura para muros de ductilidad limitada.
- b) Se afirma, que usando la interacción suelo-estructura, en el diseño de edificaciones con muros de ductilidad limitada, en comparación con un diseño sin interacción, este aumentaría de 10 a 15% en lo que respecta a Concreto y Acero.
- c) En Trujillo, debido a la gran aceptación de este sistema de muros de ductilidad limitada, por las razones de seguridad estructural y tiempo de ejecución, se recomienda optimizar mediante la inclusión del estudio de la interacción suelo-estructura, ya que permite un análisis y diseño más real.

REFERENCIAS

1. Abanto Castillo , F. (2004). *Análisis y diseño de edificaciones de albañilería*. Lima.
2. Alva, J. (2014). *Diseño de cimentaciones*. Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia (ICG).
3. Blanco, A. (2007). *Estructuración y diseño de edificaciones de concreto armado*. Lima : Capitulo de Ingeniería Civil.
4. Harmsen, T. (2019). *Diseño de Estructuras de Concreto Armado*. Lima: Fondo Editorial PUCP.
5. Juarez Badillo, E., & Rico Rodriguez, A. (1972). *Mecánica de suelos*. Mexico: Limusa.
6. Meza, J., & Valderrama, C. (2014). *Influencia de la Interacción suelo-estructura en la reducción de esfuerzos de una edificación aporticada con zapatas aisladas*. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
7. Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *Norma Técnica E030 - Diseño Sismoresistente*. Lima: El Peruano.
8. Nilson, A. (2000). *Diseño de estructuras de concreto*. Lima.
9. SAP 2000. (2019). *Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures*. Berkeley: University of California.
10. Sargsian, A.E. (2004). *Mecánica estructural*. Moscú: ASV
11. Villarreal, G. (2006). *Análisis de Estructuras con el Programa LIRA 9.0*. Lima: GVC.
12. Villarreal, G. (2006). *Interacción Suelo-Estructura en edificaciones con zapatas aisladas*. Lima: Asamblea Nacional de Rectores.
13. Villarreal, G. (2007). *Interacción suelo-estructura en edificios altos*. Lima: Asamblea Nacional de Rectores.
14. Villarreal, G. (2017). *Interacción sísmica suelo-estructura en edificaciones con plateas de cimentación*. Lima: GVC.