



**UTPL**

**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**

*La Universidad Católica de Loja*

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**Estudio comparativo de metodologías aplicadas al diseño  
de cimentaciones superficiales en suelos blandos**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

**INGENIERO CIVIL**

**Autor:** Jaramillo Guerrero, Santiago David

**Director:** Esparza Villalba, Carmen Antonieta

LOJA

**2023**



*Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>*

2023

## **Aprobación del director del Trabajo de Titulación**

Loja, 26 de enero del 2023

Título de Ingeniero civil

Belizario Amador Zárate Torres, Mgtr.

**Director de la carrera de Ingeniería Civil**

Ciudad.-

De mi consideración:

Me permito comunicar que, en calidad de director del presente Trabajo de Titulación denominado: Estudio comparativo de metodologías aplicadas al diseño de cimentaciones superficiales en suelos blandos realizado por Santiago David Jaramillo Guerrero ha sido orientado y revisado durante su ejecución, así mismo ha sido verificado a través de la herramienta de similitud académica institucional, y cuenta con un porcentaje de coincidencia aceptable. En virtud de ello, y por considerar que el mismo cumple con todos los parámetros establecidos por la Universidad, doy mi aprobación a fin de continuar con el proceso académico correspondiente.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

Director: Esparza Villalba Carmen Antonieta, Mgtr.

C.I.:

Correo electrónico: [caesparza@utpl.edu.ec](mailto:caesparza@utpl.edu.ec)

### **Declaración de autoría y cesión de derechos**

Yo, Santiago David Jaramillo Guerrero, declaro y acepto en forma expresa lo siguiente:

Ser autor (a) del Trabajo de Titulación denominado: Estudio comparativo de metodologías aplicadas al diseño de cimentaciones superficiales en suelos blandos, de la carrera de Ingeniería civil, específicamente de los contenidos comprendidos en: Marco teórico, Diseño metodológico y Análisis e interpretación de resultados, siendo Esparza Villalba Carmen Antonieta, Mgtr., directora del presente trabajo; también declaro que la presente investigación no vulnera derechos de terceros ni utiliza fraudulentamente obras preexistentes. Además, ratifico que las ideas, criterios, opiniones, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad. Eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones judiciales o administrativas, en relación a la propiedad intelectual de este trabajo.

Que la presente obra, producto de mis actividades académicas y de investigación, forma parte del patrimonio de la Universidad Técnica Particular de Loja, de conformidad con el artículo 20, literal j), de la Ley Orgánica de Educación Superior; y, artículo 91 del Estatuto Orgánico de la UTP, que establece: "Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad", en tal virtud, cedo a favor de la Universidad Técnica Particular de Loja la titularidad de los derechos patrimoniales que me corresponden en calidad de autor/a, de forma incondicional, completa, exclusiva y por todo el tiempo de su vigencia.

La Universidad Técnica Particular de Loja queda facultada para ingresar el presente trabajo al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública, en cumplimiento del artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Autor: Santiago David Jaramillo Guerrero

C.I.: 1103957104

Correo electrónico: [sdjaramillo1@utpl.edu.ec](mailto:sdjaramillo1@utpl.edu.ec)

## **Dedicatoria**

Dedico mi tesis principalmente a Dios, por darme fuerza e iluminarme en todo el proceso para poder culminar esta meta. A mis padres, por todo su amor, por motivarme a seguir adelante, por su apoyo incondicional incluso a pesar de mis errores y tropiezos. También a mis hermanas y abuelitos por brindarme su apoyo moral y emocional. A mi novia por apoyarme e impulsarme a culminar este proyecto de la mejor manera. A mis amigos cercanos por estar siempre pendientes de mi proceso. Y, finalmente, a todos quienes creyeron en mí, y formaron parte de mi proceso académico.

## **Agradecimiento**

Al ver el resultado logrado de este proyecto de fin de titulación, solamente siento gratitud.

Todo el trabajo realizado fue posible gracias al apoyo incondicional de mis padres, mis hermanas, mis abuelitos y mi novia, que estuvieron a mi lado en los momentos difíciles. Gracias, también, a mis amigos, que me dieron su contención.

Nada de esto hubiera sido posible sin ustedes. Este trabajo es el resultado de un sinfín de acontecimientos que poco tuvieron que ver con lo académico, sino más bien, con el amor.

Gracias infinitas a ustedes y, por supuesto, a Dios, por ponerlos en mi camino.

## Índice de contenido

Aprobación del director del trabajo de titulación .....	II
Declaración de autoría y cesión de derechos .....	IV
Dedicatoria.....	VI
Agradecimiento .....	VII
Índice de contenido .....	VIII
Índice de tablas .....	XI
Índice de figuras.....	XI
Resumen .....	1
Abstract.....	2
Introducción.....	3
Capítulo uno .....	5
Marco teórico.....	5
1.1    Cimentaciones superficiales .....	5
1.1.1    Limos.....	6
1.2    Capacidad portante (BC).....	6
1.2.1    Capacidad de carga última ( $q_u$ ).....	7
1.3    Tipos de fallas .....	7
1.3.1    Falla por corte .....	7
1.3.1.1 Cortante en una dirección.....	7
1.3.1.2 Cortante por punzonamiento.....	9

1.3.2	<i>Momento flector</i> .....	10
1.4	Método Winkler por MEF.....	11
1.4.1	<i>Interacción suelo-estructura ISE</i> .....	11
1.4.2	<i>Método Winkler</i> .....	11
1.4.3	<i>Coeficiente de balasto</i> .....	12
1.4.4	<i>Método de elementos finitos MEF</i> .....	12
	Capítulo dos.....	13
	Diseño metodológico.....	13
2.1	Estudio de suelo.....	13
2.1.1	<i>Estratificación del suelo</i> .....	13
2.1.2	<i>Ensayos de laboratorio</i> .....	13
2.1.3	<i>Ensayo de penetración estándar SPT</i> .....	14
2.2	Métodos de diseño.....	15
2.2.1	<i>Diseño de la cimentación</i> .....	15
2.2.2	<i>Espesor de la cimentación</i> .....	15
2.2.3	<i>Área de la cimentación</i> .....	15
2.2.4	<i>Distribución de acero</i> .....	15
2.3	Software.....	16
2.4	Combinaciones de carga.....	16
2.5	Discretización de los modelos.....	17
2.6	Modelo 1.....	19
2.7	Modelo 2.....	21
	Capítulo tres.....	24
	Análisis e interpretación de resultados.....	24

	X
<b>3.1 Tipo de suelo .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2 Cargas .....</b>	<b>24</b>
<b>3.3 Parámetros de los modelos.....</b>	<b>24</b>
<b>3.4 Dimensiones.....</b>	<b>25</b>
<b>3.5 Presión sobre el suelo .....</b>	<b>25</b>
<b>3.6 Cortantes y momentos.....</b>	<b>26</b>
<b>3.7 Resumen de acero y espesor.....</b>	<b>28</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>30</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>32</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>33</b>
<b>Apéndices .....</b>	<b>36</b>
<b>Apéndice A.....</b>	<b>36</b>

### Índice de tablas

<b>Tabla 1 Capacidad de carga en función del ensayo SPT.....</b>	<b>14</b>
<b>Tabla 2 Dimensiones para la cimentación .....</b>	<b>25</b>
<b>Tabla 3 Presión máxima del suelo .....</b>	<b>26</b>
<b>Tabla 4 Cortantes y momentos máximos en sentido X modelo 1.....</b>	<b>26</b>
<b>Tabla 5 Cortantes y momentos máximos en sentido Y modelo 1.....</b>	<b>27</b>
<b>Tabla 6 Cortantes y momentos máximos en sentido X modelo 2.....</b>	<b>27</b>
<b>Tabla 7 Cortantes y momentos máximos en sentido Y modelo 2.....</b>	<b>27</b>
<b>Tabla 8 Resumen de acero y espesor obtenidos para el modelo 1 .....</b>	<b>28</b>
<b>Tabla 9 Resumen de acero y espesor obtenidos para el modelo 2.....</b>	<b>29</b>

### Índice de figuras

<b>Figura 1 Tipos de cimentaciones superficiales .....</b>	<b>5</b>
<b>Figura 2 Diagrama de cortante en un sentido .....</b>	<b>8</b>
<b>Figura 3 Diagrama de cortante por punzonamiento .....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 4 Franjas de diseño para losa de cimentación, método rígido convencional....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 5 Asentamientos diferenciales máximos .....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 6 Cálculo del área y la presión neta .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 7 Cálculo del factor de amplificación de carga y del peralte efectivo.....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 8 Diseño de las franjas de la losa .....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 9 Diagrama de presión sobre el suelo con cargas de servicio .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 10 Diagrama de momentos flectores en sentido X y sentido Y .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 11 Diagrama de esfuerzos cortantes en sentido X y sentido Y .....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 12 Diagrama de índice de punzonamiento .....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 13 Franjas de diseño para losa de cimentación, método Winkler mediante elementos finitos en sentido X.....</b>	<b>28</b>

**Figura 14 Franjas de diseño para losa de cimentación, método Winkler mediante  
elementos finitos en sentido Y..... 29**

## Resumen

La capacidad de soporte de los suelos blandos es un factor determinante para poder realizar el diseño de cimentaciones superficiales, existen varios tipos de cimentaciones, así como metodologías de diseño. La capacidad de soporte es el principal condicionante para el diseño de este tipo de cimentaciones. Por lo tanto, para edificaciones simétricas de 4 pisos con ocupación habitacional y un suelo limoso tipo "MH", los tipos de cimentaciones se ven limitados a diseños de losas de cimentación porque la capacidad del suelo se ve superada por la presión que ejerce la estructura. En el presente trabajo se comparó el diseño de losas de cimentación mediante el método tradicional y el método Winkler modelado por elementos finitos, se los modeló en Excel y Safe 2016 respectivamente. Para una capacidad portante de 9.25 ton/m<sup>2</sup> los resultados de presión sobre el suelo obtenidos por ambos métodos son de 7.33 ton/m<sup>2</sup> para el método tradicional y 9.23 ton/m<sup>2</sup> para el método Winkler modelado por elementos finitos siendo esto el principal resultado requerido para proceder al diseño del armado de la sub-estructura.

*Palabras clave:* cimentaciones, método tradicional, método Winkler.

### **Abstract**

The support capacity of soft soils is a determining factor to make a design of superficial foundations, there are various types of foundations, as well as design methodologies. The support capacity is the main condition to design this type of foundations. Therefore, for symmetrical buildings of 4 floors with residential occupancy and a loamy soil type "MH", the types of foundations are limited to the designs of foundation slab because the capacity of the soil is exceeded by the pressure exerted by the structure. In this work, is compared foundation slabs designed by traditional method and the Winkler method modeled by finite elements, it is modeling in Excel and Safe 2016 respectively. For a bearing capacity of 9.25 ton/m<sup>2</sup>, the soil pressure results obtained by both methods are 7.33 ton/m<sup>2</sup> for the traditional method and 9.23 ton/m<sup>2</sup> for the Winkler method modeled by finite elements and this is the main result required for procedure to design the assemble of the sub-structure.

Keywords: foundation, traditional method, Winkler method.

## Introducción

Conocer las características mecánicas del suelo es algo de vital importancia al diseñar una cimentación superficial (CS). El suelo se forma a partir de la meteorización de rocas a través del tiempo con la influencia de factores climatológicos (Crespo, 2004, p.19). El suelo que se tiene en este proyecto son limos. Se sabe que los limos en condiciones sueltas o saturadas son bastante malos para soportar cargas mediante zapatas, (Briones & Irigoín, 2015, p.28). Por ello se debe diseñar adecuadamente, así como, considerar el tipo de suelo sobre el que se va a colocar la cimentación de una edificación para evitar asentamientos, deformaciones o esfuerzos adicionales en miembros estructurales.

Es muy importante, para el diseño de CS, conocer la capacidad portante del suelo "Bearing capacity" (BC) por sus siglas en inglés. Según la literatura existen varias metodologías para determinar su valor, tomando en cuenta las propiedades del suelo, su forma y estratificación (García, 2017, p.6). Es necesario no superar esta capacidad para que el diseño de una CS sea adecuado, eso es lo que se ha hecho en este proyecto para que los diseños sean viables para el tipo de suelo establecido en donde no se ha modificado su BC mediante un mejoramiento del estrato.

Otro aspecto muy importante es, la interacción suelo estructura, esto se puede expresar como la acción de la inercia y el desplazamiento que experimenta la estructura y el suelo debido a la flexibilidad que presenta el mismo frente a excitaciones sísmicas (Avilés, 1999). Diseñar una CS como empotramiento perfecto, considerando que el suelo es totalmente rígido acarrea un error ya que se tiene que los módulos de corte y secante son mínimos (Morales y Espinosa, 2020).

Esto último es el principal contraste entre el método convencional y el método Winkler modelado por elementos finitos. En este proyecto se contrastó el modelado del método

convencional que considera la masa de suelo como un elemento rígido versus el método Winkler modelado por elementos finitos donde se idealiza al suelo mediante una cierta cantidad de resortes para lo cual el programa Safe 16 fue preciso para realizar un modelado eficiente.

Esta investigación aporta al ODS 9 “Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación” (Organización Internacional del Trabajo, 2017, p78). Aportando seguridad para las edificaciones frente a catástrofes naturales.

El presente proyecto, se enfocó en elaborar un análisis de los resultados que se obtengan, considerando, Cuánto varían dichas metodologías y cuál de estas es la más eficiente y segura. La metodología se hizo de la siguiente manera, en primer lugar, se estableció un perfil de suelo con sus respectivos parámetros. Posteriormente, se realizó el diseño estructural de una losa de cimentación como CS usando dos metodologías de análisis: (1) convencional, (2) cimentación tipo Winkler mediante análisis de elementos finitos. Se utilizó Excel para los cálculos del método convencional y Safe 2016 para simular el comportamiento del suelo como resortes lineales, luego se realizó un modelo en base a elementos finitos para obtener la respuesta del suelo en función de sus características. Posteriormente, se comparó de manera cualitativa y cuantitativa los resultados obtenidos.

La importancia de determinar cuál de estas metodologías es más eficiente y segura va a evitar que suceda sobredimensionamiento en las obras o el caso opuesto en el que la subestructura no sea capaz de soportar las cargas recibidas y por ende se dé el colapso de la superestructura.

La tesis estará compuesta por tres capítulos y se organizará de la siguiente manera: Capítulo I “Marco teórico”, Capítulo II “Diseño metodológico”, Capítulo III “Análisis e interpretación de resultados”.

## Capítulo uno

### Marco teórico

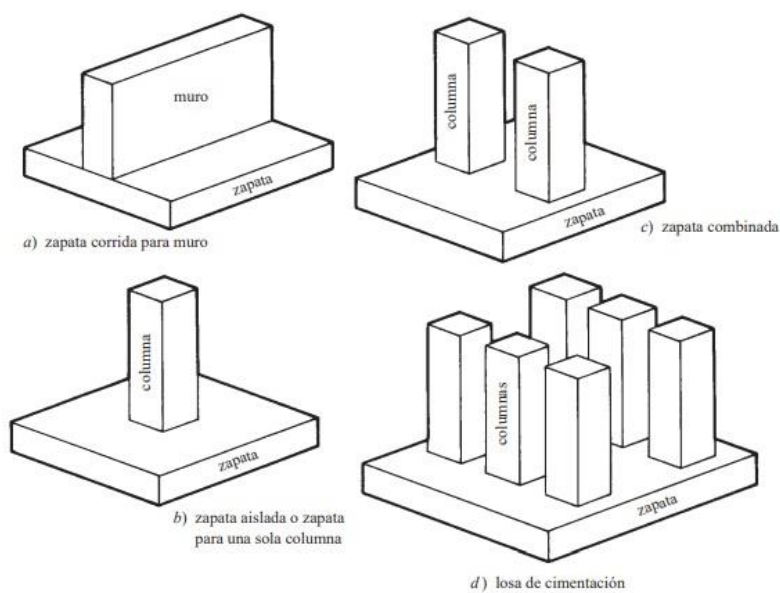
#### 1.1 Cimentaciones superficiales

Una cimentación superficial (CS), es aquella que tiene una profundidad de cimentación no mayor a 4 veces el ancho de la cimentación (Das, 2011, p.136). También se puede considerar como (CS) aquellas subestructuras que tengan una profundidad de enterramiento menor a 4m (Garza, 2004, p.12).

Existen varios tipos de (CS), entre ellas están las siguientes: zapata aislada, zapata combinada, zapata corrida y losa de cimentación; ver Figura 1. La función de cada una de estas es transmitir la carga de la super estructura al suelo de soporte (Garza, 2004, p.13).

**Figura 1**

*Tipos de cimentaciones superficiales*



*Nota.* [imagen], por (McCorman, 2011).

Los suelos blandos son aquellos que después de realizar un tamizaje y tomando como punto de análisis el porcentaje que atraviesa el tamiz #200 superen al 50% (Crespo, 2004, p.88).

### **1.1.1 Limos**

Debido a su capacidad de absorber humedad, los limos generan inconvenientes en el tema de construcción de edificaciones. Se sabe que los suelos blandos están formados por varias tipologías de este (arcillas, limos, arenas). De acuerdo con el (sistema unificado de clasificación de suelos) SUCS la notación que se le otorga a las arcillas es la letra "M" y se la clasifica en conjunto a los demás tipos de suelo finos en base a los ensayos de límites de Atterberg (Crespo, 2004, p.89). Los limos son partículas microscópicas formados generalmente por fragmentos de cuarzo muy finos y residuos de minerales micáceos (Das, 2013, p. 28). Los limos tienen la particularidad de que, si no se encuentran en una alta densidad son incapaces de usarse para soportar cimentaciones (Roldán de Paz, 2010, p.8).

## **1.2 Capacidad portante (BC)**

En construcción se conoce que la (BC) es la cualidad que tiene el suelo de sostener la presión que ejerce la estructura sobre sí mismo, varía en función de los componentes del suelo y puede ser mejorable haciendo cambio de suelo o utilizando columnas de piedra para atenuar los asentamientos y dar estabilidad a la estructura (Gavilanes, 2019, p.14). Existen ensayos que llevan a mejores resultados para obtener el valor de BC como: Triaxial no drenado no consolidado, ensayo de penetración estándar (SPT) penetración dinámica ligera (DPL), corte directo, etc. pero algunos tienen costos muy elevados para realizarse (Fernández Gálvez, 2015, p.1).

### **1.2.1 Capacidad de carga última ( $q_u$ )**

La falla por capacidad de carga última es aquella que se genera cuando la ( $q_u$ ) es igual a la carga aplicada por unidad de área la cual genera asentamientos y movimientos considerables que generan una falla en el suelo y esta se extiende hasta la superficie del terreno (Das, 2011, p.133).

## **1.3 Tipos de fallas**

### **1.3.1 Falla por corte**

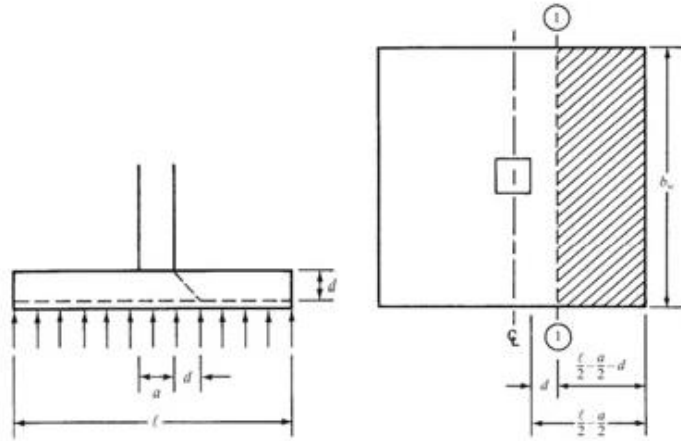
Si la carga aplicada sobre un área unitaria es igual a la carga última ( $q_u$ ) lo que ocurre es una falla sobre el suelo que sostiene la cimentación la cual se conoce como falla por corte, de estas existen de varios tipos: falla general por corte y falla de corte por punzonamiento (Das, 2011, p.133-134).

**1.3.1.1 Cortante en una dirección.** El cortante en una dirección se encuentra ubicado a una distancia “d” denominada altura efectiva a partir de la cara lateral de la columna (McCorman, 2011, p.352). Según la ecuación 22.5.5.1 (a) del código ACI 318-14 se calculó con la siguiente ecuación, donde el factor  $\lambda$  es igual a 1 según las tablas 19.2.4.2 del código ACI 318-14.

$$V_c = 0.53 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d \quad (1)$$

**Figura 2**

*Diagrama de cortante en un sentido*



*Nota.* Diagrama de posición del esfuerzo cortante [imagen], por (McCorman, 2011).

$$d = h - \text{rec} - \frac{\phi}{2} \quad (2)$$

Según la sección 22.5.8 del código ACI 318-14 debe cumplirse la siguiente condición, donde  $\phi = 0.75$ :

$$\phi V_c > V_u \quad (3)$$

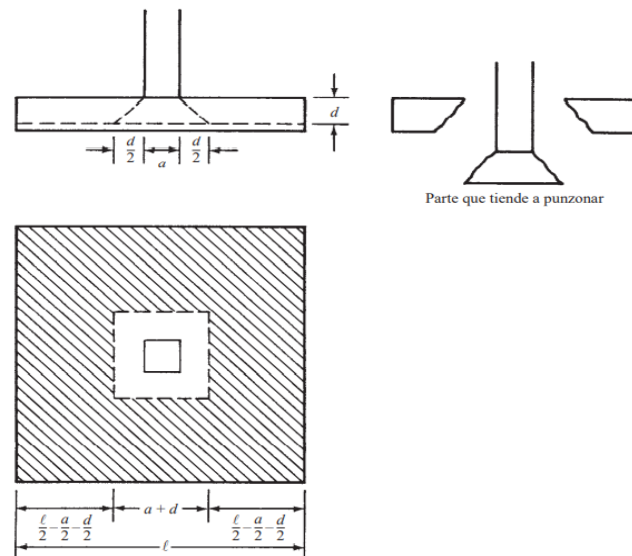
Donde  $V_u$  se calcular de la siguiente manera:

$$V_u = q_d * \left( \frac{L}{2} - \frac{a}{2} - d \right) * b_w \quad (4)$$

**1.3.1.2 Cortante por punzonamiento.** El punzonamiento en la cimentación ocurre alrededor de la columna a una distancia  $\frac{d}{2}$  según la sección 22.6.4 del código ACI 318-14 a partir de las caras de la columna y la falla que suele producir tiene una forma de pirámide truncada con un ángulo de inclinación cercano a los  $45^\circ$  (Arthur H. Nilson, 2001, p.506).

**Figura 3**

*Diagrama de cortante por punzonamiento*



*Nota.* Diagrama de posición del punzonamiento [imagen], por (McCorman, 2011).

El esfuerzo cortante último viene dado por la siguiente expresión, donde  $A$  es el área total de la cimentación y  $b_o$  es el área central delimitada por la zona de punzonamiento:

$$V_u = q_d \cdot (A - b_o) \quad (5)$$

La resistencia nominal al cortante por punzonamiento se encuentra escogiendo el menor valor resultante de las siguientes ecuaciones dadas en la sección 22.6.5.2 del código ACI 318-14:

$$V_c = 1.1 * \lambda * \sqrt{f_c} \quad (6)$$

$$V_c = 0.53 * \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) * \lambda * \sqrt{f_c} \quad (7)$$

$$V_c = 0.27 * \left(2 + \frac{\alpha_s * d}{b_o}\right) * \lambda * \sqrt{f_c} \quad (8)$$

El factor  $\beta$  es la relación del lado largo al lado corto de la sección de la columna, carga concentrada o área de reacción.

El factor  $\alpha_s$  viene dado en la sección 22.6.5.3 del código ACI 318-14 donde dice que se utiliza un valor de 40 para columnas interiores, 30 para columnas de borde y 20 para columnas esquineras.

### 1.3.2 *Momento flector.*

La localización de la sección crítica que va a trabajar a flexión se encuentra en el apartado 13.2.7 del código ACI 318-14. Cabe recalcar que el acero superior en cimentaciones será la cuantía mínima entre el acero mínimo y el acero requerido por temperatura. La altura de la cimentación debe ser tal que la altura efectiva del refuerzo inferior sea de al menos 150 mm como se especifica en la sección 13.3.1.2 del código ACI 318-14. La separación del acero de refuerzo no debe superar  $3h$  o 450 mm como se especifica en la sección 7.7.2.3 del código ACI 318-14.

$$M_{ux} = q_d * \left(\frac{L-a}{2}\right) * b_w * \left(\frac{L-a}{4}\right) \quad (9)$$

$$M_{uy} = q_d * \left(\frac{b_w - a}{2}\right) * L * \left(\frac{b_w - a}{4}\right) \quad (10)$$

## 1.4 Método Winkler por MEF.

### 1.4.1 Interacción suelo-estructura ISE.

El movimiento del suelo se ve alterado cuando este interactúa con una estructura, a esto se lo conoce como Interacción suelo estructura ISE (Soriano, 1989, p.288). La ISE considera al suelo de forma elástica y a los estímulos sísmicos como un fenómeno ondulatorio (Villarreal Castro, 2009, p. 10).

Para realizar un modelo ISE adecuado se necesita determinar adecuadamente el comportamiento del suelo en contacto con la estructura que claramente será diferente al comportamiento del suelo libre ya que apoyar una cimentación sobre él, alterará el movimiento en conjunto frente a un evento sísmico (Soriano, 1989).

El modelo ISE se encarga de representar al suelo a través de resortes, los mismos que tienen un amortiguamiento y una rigidez determinada.

Existen diversas formas de emplear el modelo ISE. (Toapanta Tixilema) encontró que al utilizar el módulo de balasto al realizar el modelo ISE, los períodos de vibración al considerar la ISE resultan ser menores que el modelo que no considera la ISE (2016). El módulo de balasto se obtiene a través de un ensayo de placa de carga y este valor se usa para modelos no dinámicos de ISE (Espinosa Stead y Carrión Granja, 2019, p. 13).

### 1.4.2 Método Winkler.

El asentamiento producido en un punto es proporcional a la carga que soporta siendo transmitida al suelo a través de la cimentación. La formulación del método plantea un suelo

elástico a través de resortes pero se contrapone con la idealización de un módulo de Young (E) que varía de forma lineal en función de la profundidad y se considera nulo en la superficie de contacto (Freire Tellado, 1999, p.26).

Hay opiniones que hacen al método Winkler poco fiable donde se dice que el módulo de balasto no es solo una función del suelo, sino que también influye la geometría de la cimentación y la estructura soportada por la misma. También se plantea la irrealidad del modelo debido a que se establece un comportamiento lineal del suelo y no algo más parecido a la realidad donde el suelo se deforma en toda la superficie que ocupa la cimentación, incluso en los bordes (Valderrama Carpio y Meza Rodríguez, 2014, p.24).

#### **1.4.3 Coeficiente de balasto.**

Este coeficiente es dependiente del módulo de compresión del suelo, de la geometría de la cimentación, de la proporción entre geometría y cargas soportadas, de la rigidez del cimiento y del nivel de las cargas (Freire Tellado, 1999, p27).

El valor del coeficiente de balasto “k” se puede determinar de diferentes formas; a partir de tablas, a partir del ensayo de placa de carga, a través de un ensayo de laboratorio in situ, a partir del módulo de compresión del suelo, etc (Freire Tellado, 1999 p.30). Para este caso particular se va a introducir la utilización de la tabla propuesta en varios libros. (Ver anexo 1).

#### **1.4.4 Método de elementos finitos MEF.**

El MEF se encarga de transformar un elemento de características continuas en un modelo discreto, a esto se le denomina como discretizar el modelo. Lo que sucede en el interior de este modelo se calcula con la interpolación de los resultados dados en cada punto de contacto o nodo. Por tanto, se puede considerar que este método es un valor aproximado de un número finito de resultados obtenidos en cada punto de contacto (Turcios Medina, 2020, p.18).

## Capítulo dos

### Diseño metodológico

#### 2.1 Estudio de suelo

A partir de un estudio de suelo base realizado en el barrio Carigán de la parroquia Sucre en la ciudad de Loja, se tomó el valor de capacidad de carga en función del ensayo SPT para poder desarrollar una losa de cimentación por los métodos de diseño tradicional y Winkler por elementos finitos entre los cuales posteriormente se compararon sus resultados. Principalmente se tomó en cuenta la capacidad portante existente a una profundidad de 1.00m la cual está dentro del rango de profundidad para ser considerada como cimentación superficial y así mismo tenemos un comportamiento blando del suelo. En este estudio se determinaron las características geológicas y las propiedades geotécnicas del suelo, mediante el ensayo de Penetración Estándar (SPT) y los análisis para clasificación de suelo. Dichos ensayos se realizaron hasta una profundidad de 5.00m.

##### 2.1.1 Estratificación del suelo.

El suelo está compuesto por limo inorgánico de alta plasticidad, de consistencia firme y dura de color gris claro "MH" según la clasificación SUCS.

##### 2.1.2 Ensayos de laboratorio.

Después de obtener las muestras se realizaron los siguientes ensayos para la obtención de parámetros necesarios para el diseño:

1. Análisis Granulométrico ASTM D-422
2. Límite líquido ASTM D-4318
3. Límite plástico ASTM D-4318

4. Índice de plasticidad ASTM D-4318
5. Clasificación SUCS y AASHTO

### 2.1.3 Ensayo de penetración estándar SPT.

El ensayo de (SPT) se realizó a partir de una profundidad de 1 m. Este ensayo permite calcular la resistencia del suelo con respecto del esfuerzo cortante mediante correlaciones empíricas del número de golpes.

El ensayo consistió en hincar el penetrómetro 45 cm con una masa de 63 kg. Esta masa se dejó caer desde 75 cm de altura y se contabilizó el número de golpes necesarios para penetrar los últimos 30 cm.

**Tabla 1**

*Capacidad de carga en función del ensayo SPT*

Prof (m)	Cota (msnm)	N <sub>SPT</sub>	N <sub>60</sub>	q <sub>a</sub> (ton/m <sup>2</sup> )
0.50	2213.50	16	10	11.57
1.00	2213.00	13	8	9.25
2.00	2212.00	12	8	9.25
3.00	2211.00	25	18	20.82
4.00	2210.00	37	26	30.08
5.00	2209.00	66	47	54.37

*Nota.* Capacidad de carga admisible del suelo del proyecto.

## 2.2 Métodos de diseño

### 2.2.1 Diseño de la cimentación.

El diseño estructural se realizó en base al libro “Diseño de concreto reforzado” de Jack McCorman 8va edición para el método tradicional y a los códigos ACI 318-14. El modelo de diseño elaborado mediante el método tradicional se realizó en Excel.

### 2.2.2 Espesor de la cimentación.

Según el código ACI 318-14 y la sección 13.3.1.2 se seleccionó una altura efectiva del refuerzo inferior de 15 cm y considerando la tabla 20.6.1.3.3 se escogió un recubrimiento de 5 cm cuando el hormigón esté en contacto constante con el suelo.

### 2.2.3 Área de la cimentación.

Para el dimensionamiento de la cimentación, la fuerza de la super estructura (F) se consideró como la suma de cargas de servicio, carga muerta (CM) y carga viva (CV) mayoradas aun cuando la capacidad admisible del suelo ( $q_{adm}$ ) ya incluye un FS=3.

$$A = \frac{F}{q_{adm}} \quad (11)$$

### 2.2.4 Distribución de acero

Después de calcular el momento de diseño con las ecuaciones 9 y 10, se calcula la cuantía de acero mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = 0.85 \cdot \frac{f_c}{f_y} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2.35 \cdot M_u}{f_c \cdot \phi \cdot b \cdot d^2}}\right) \quad (12)$$

Se establece que  $b = 100$  cm como ancho unitario de la cimentación y el coeficiente  $\phi$  que viene dado en la tabla 21.2.2 del código ACI 318-14.

Después de obtener la cuantía requerida se calcula el área de acero necesaria con la siguiente ecuación:

$$A_s = \rho * b * d \quad (13)$$

El número de varillas se calcula de la siguiente manera donde  $A_v$  representa el área de la varilla que se va a utilizar y se redondea al entero superior:

$$\#V = \frac{A_s}{A_v} \quad (14)$$

El espaciamiento entre los refuerzos se determina mediante la siguiente ecuación:

$$S = \frac{b_w - (2 * rec)}{\#V - 1} \quad (15)$$

### 2.3 Software

Se usó el software Excel en donde se programó una hoja de cálculo para el diseño de la cimentación por el método rígido convencional utilizando las ecuaciones que se muestran en el capítulo anterior.

Mientras que para el diseño de la cimentación por el método Winkler modelado por elementos finitos se utilizó el software Safe 16 el cual incluye un módulo interno para el análisis por dicho método.

### 2.4 Combinaciones de carga

Se realizaron dos diseños en base a las combinaciones de cargas que establece la NEC 2015, para ello se idealizó un edificio de 4 pisos donde la separación horizontal entre ejes

fue de 3.50m mientras que en horizontal fue de 3m y se establecieron las cargas de acuerdo con la segunda combinación de carga cuya ecuación es la siguiente:

$$Q = 1.2 * CM + 1.6 * CV \quad (16)$$

Donde  $CM$  representa la carga muerta o el peso propio de la estructura y  $CV$  representa la carga viva.

Se asumió una carga viva y una carga muerta que va a ser transmitida por cada columna hacia la cimentación considerando una estructura simétrica de 4 pisos. La carga viva se establece en la normativa NEC-SE-CG-2015, siendo esta de 0.20 ton/m<sup>2</sup>. La carga muerta se escogió de manera preliminar considerando el peso propio de losa, vigas y columnas, así como las cargas de mampostería establecidas en la normativa NEC-SE-CG-2015, siendo esta de 0.20 ton/m<sup>2</sup>. Posteriormente se realizó la mayoración con la segunda combinación de cargas de la NEC-SE-CG-2015 con la ecuación (16) del capítulo 2.

De esta manera se obtuvo una  $CM$  de 32.688 ton, 19.9632 ton, 13.0248 ton para las columnas centrales, medianeras y esquineras respectivamente; y una  $CV$  de 8.4 ton, 4.2 ton y 2.1 ton para las columnas centrales, medianeras y esquineras respectivamente. Estos fueron los valores preliminares en base a los cuales se diseñó la losa de cimentación.

## 2.5 Discretización de los modelos

Para este proyecto se establecieron dos modelos diferentes los cuales fueron desarrollados de manera individual, ambos se van a cimentar a una profundidad de 1.00m donde se tiene una capacidad de soporte del suelo de  $9.25 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$ .

- Modelo 1: Diseño de losa de cimentación por el método rígido convencional.

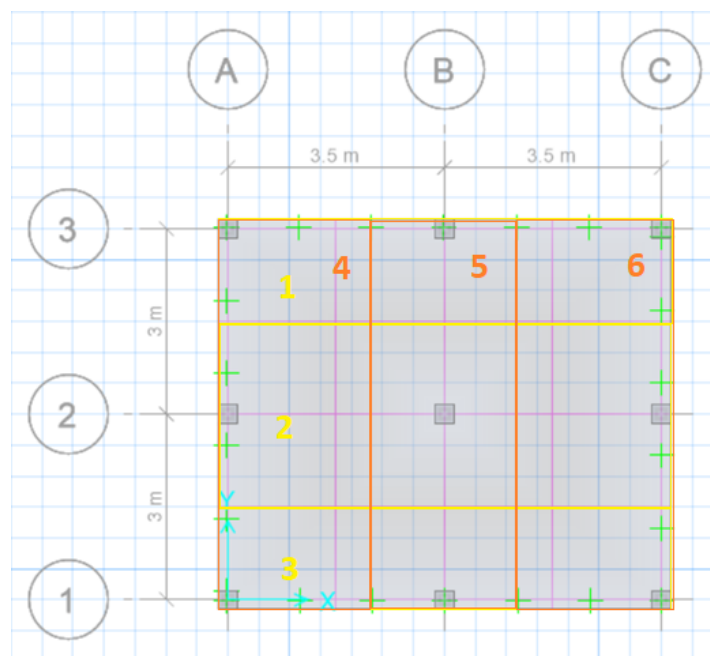
- Modelo 2: Diseño de losa de cimentación por el método Winkler mediante elementos finitos.

La división de las franjas para el diseño de la losa de cimentación se hizo desde la 1 a la 6 y sus medidas están en cm, son: 190, 350, 190, 165, 300, 165, respectivamente, ver Figura 4.

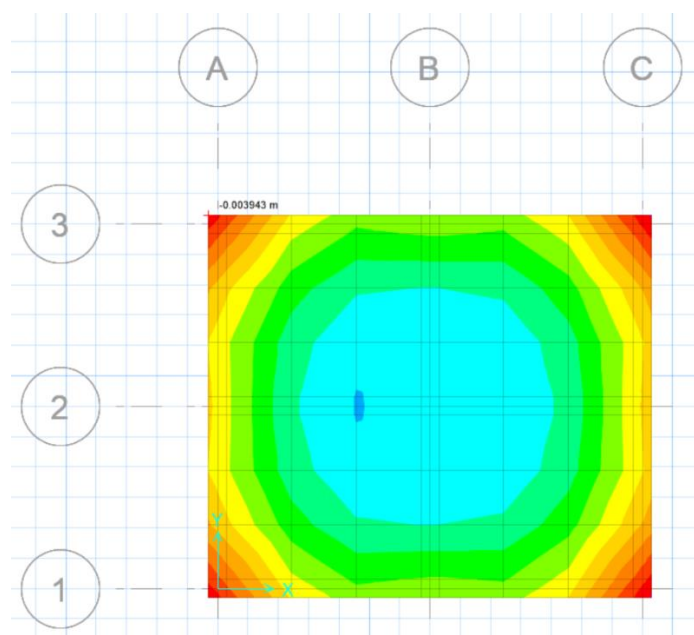
Según el apartado 6.3 de la NEC-SE-CM, considerando que nuestros modelos representan una edificación con pórticos de concreto, se tiene un asentamiento diferencial máximo de 0.01167m. En estos diseños tenemos un asentamiento máximo de 0.003943m, ver Figura 5.

**Figura 4**

*Franjas de diseño para losa de cimentación, método rígido convencional*



*Nota.* Franjas de diseño en sentido X y sentido Y.

**Figura 5***Asentamientos diferenciales máximos*

*Nota.* Asentamiento máximo producido en la losa de cimentación.

## 2.6 Modelo 1

Para este modelo se realizó una hoja de cálculo en Excel donde se fueron realizando cálculos que detallaremos a continuación.

En este apartado se desarrolló el cálculo de la presión neta, donde, se obtuvo que la presión ejercida por la losa sobre el suelo es de  $0.575 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$  la cual es inferior a la presión que este resiste que es de  $0.7333 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ , ver Figura 6.

Para el cálculo del factor de amplificación de carga se puede ver el resultado para cada franja en la Figura 7, además en la misma se procedió a hacer el cálculo del peralte efectivo a partir del punzonamiento, donde, con apoyo de Safe 16 se estableció un valor de 35cm el cual fue usado en el desarrollo de ambos modelos para que cumpla en todas las columnas, central, medianera y esquinera.

Figura 6

Cálculo del área y la presión neta

<b>1. Cálculo del Área de la losa</b>																																																																																																													
Longitud total en la dirección X	Lx=	6.30 m	A = Lx * Ly																																																																																																										
Longitud total en la dirección Y	Ly=	7.30 m	A= 45.99 m <sup>2</sup>																																																																																																										
<b>2. Cálculo de la presión neta</b>																																																																																																													
qn = qa - γs1 x h1 - γs2 x h2 - γi x hi - γc <sup>0</sup> x hc <sup>0</sup> - s/c					qn= 0.733 kg/cm <sup>2</sup>																																																																																																								
Resultantes	X' = $\frac{\sum P_i \cdot X'_i}{\sum P_i}$	X'= 3.15 m	Y' = 3.65 m	X' = $\frac{\sum P_i \cdot X'_i}{\sum P_i}$																																																																																																									
Excentricidades	ex = X' - Lx/2	ex= 0.00 cm	ey= 0.00 cm	ey = Y' - Ly/2																																																																																																									
Peso total mayorada de la edificación	Pu=	264.8 ton	Pu= 264.77 ton																																																																																																										
Inercia	Ix = (B * L <sup>3</sup> )/12	Ix= 204.2 m <sup>4</sup>	Iy= 152.1 m <sup>4</sup>	Iy = (L * B <sup>3</sup> )/12																																																																																																									
Momentos	Mx = Pu * ey	Mx= 0.0 ton-m	My= 0.00 ton-m	Mx = Pu * ex																																																																																																									
$q = \frac{Pu}{A} \pm \frac{My \cdot X}{Iy} \pm \frac{Mx \cdot Y}{Ix}$																																																																																																													
<table border="1"> <tr> <td>5.757</td> <td>0.00 X</td> <td>0.00 Y</td> </tr> </table>						5.757	0.00 X	0.00 Y																																																																																																					
5.757	0.00 X	0.00 Y																																																																																																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>PUNTOS</th> <th>Pu/A</th> <th>X (m)</th> <th>(My X)/Iy</th> <th>Y (m)</th> <th>(Mx Y)/Ix</th> <th>q (Kg/cm<sup>2</sup>)</th> <th>Verificación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>A</td><td>5.76</td><td>-3.15</td><td>0.00</td><td>3.65</td><td>0.00</td><td>0.575</td><td>qn &gt; q OK</td></tr> <tr><td>B</td><td>5.76</td><td>1.5</td><td>0.00</td><td>3.65</td><td>0.00</td><td>0.575</td><td>qn &gt; q OK</td></tr> <tr><td>C</td><td>5.76</td><td>1.5</td><td>0.00</td><td>3.65</td><td>0.00</td><td>0.575</td><td>qn &gt; q OK</td></tr> <tr><td>D</td><td>5.76</td><td>3.15</td><td>0.00</td><td>3.65</td><td>0.00</td><td>0.575</td><td>qn &gt; q OK</td></tr> <tr><td>E</td><td>5.76</td><td>-3.15</td><td>0.00</td><td>1.75</td><td>0.00</td><td>0.575</td><td>qn &gt; q OK</td></tr> <tr><td>F</td><td>5.76</td><td>3.15</td><td>0.00</td><td>1.75</td><td>0.00</td><td>0.575</td><td>qn &gt; q OK</td></tr> <tr><td>G</td><td>5.76</td><td>-3.15</td><td>0.00</td><td>-1.75</td><td>0.00</td><td>0.575</td><td>qn &gt; q OK</td></tr> <tr><td>H</td><td>5.76</td><td>3.15</td><td>0.00</td><td>-1.75</td><td>0.00</td><td>0.575</td><td>qn &gt; q OK</td></tr> <tr><td>I</td><td>5.76</td><td>-3.15</td><td>0.00</td><td>-3.65</td><td>0.00</td><td>0.575</td><td>qn &gt; q OK</td></tr> <tr><td>J</td><td>5.76</td><td>-1.5</td><td>0.00</td><td>-3.65</td><td>0.00</td><td>0.575</td><td>qn &gt; q OK</td></tr> <tr><td>K</td><td>5.76</td><td>1.5</td><td>0.00</td><td>-3.65</td><td>0.00</td><td>0.575</td><td>qn &gt; q OK</td></tr> <tr><td>L</td><td>5.76</td><td>3.15</td><td>0.00</td><td>-3.65</td><td>0.00</td><td>0.575</td><td>qn &gt; q OK</td></tr> </tbody> </table>						PUNTOS	Pu/A	X (m)	(My X)/Iy	Y (m)	(Mx Y)/Ix	q (Kg/cm <sup>2</sup> )	Verificación	A	5.76	-3.15	0.00	3.65	0.00	0.575	qn > q OK	B	5.76	1.5	0.00	3.65	0.00	0.575	qn > q OK	C	5.76	1.5	0.00	3.65	0.00	0.575	qn > q OK	D	5.76	3.15	0.00	3.65	0.00	0.575	qn > q OK	E	5.76	-3.15	0.00	1.75	0.00	0.575	qn > q OK	F	5.76	3.15	0.00	1.75	0.00	0.575	qn > q OK	G	5.76	-3.15	0.00	-1.75	0.00	0.575	qn > q OK	H	5.76	3.15	0.00	-1.75	0.00	0.575	qn > q OK	I	5.76	-3.15	0.00	-3.65	0.00	0.575	qn > q OK	J	5.76	-1.5	0.00	-3.65	0.00	0.575	qn > q OK	K	5.76	1.5	0.00	-3.65	0.00	0.575	qn > q OK	L	5.76	3.15	0.00	-3.65	0.00	0.575	qn > q OK
PUNTOS	Pu/A	X (m)	(My X)/Iy	Y (m)	(Mx Y)/Ix	q (Kg/cm <sup>2</sup> )	Verificación																																																																																																						
A	5.76	-3.15	0.00	3.65	0.00	0.575	qn > q OK																																																																																																						
B	5.76	1.5	0.00	3.65	0.00	0.575	qn > q OK																																																																																																						
C	5.76	1.5	0.00	3.65	0.00	0.575	qn > q OK																																																																																																						
D	5.76	3.15	0.00	3.65	0.00	0.575	qn > q OK																																																																																																						
E	5.76	-3.15	0.00	1.75	0.00	0.575	qn > q OK																																																																																																						
F	5.76	3.15	0.00	1.75	0.00	0.575	qn > q OK																																																																																																						
G	5.76	-3.15	0.00	-1.75	0.00	0.575	qn > q OK																																																																																																						
H	5.76	3.15	0.00	-1.75	0.00	0.575	qn > q OK																																																																																																						
I	5.76	-3.15	0.00	-3.65	0.00	0.575	qn > q OK																																																																																																						
J	5.76	-1.5	0.00	-3.65	0.00	0.575	qn > q OK																																																																																																						
K	5.76	1.5	0.00	-3.65	0.00	0.575	qn > q OK																																																																																																						
L	5.76	3.15	0.00	-3.65	0.00	0.575	qn > q OK																																																																																																						

Nota. Hoja de cálculo Excel para el método rígido convencional.

Figura 7

Cálculo del factor de amplificación de carga y del peralte efectivo

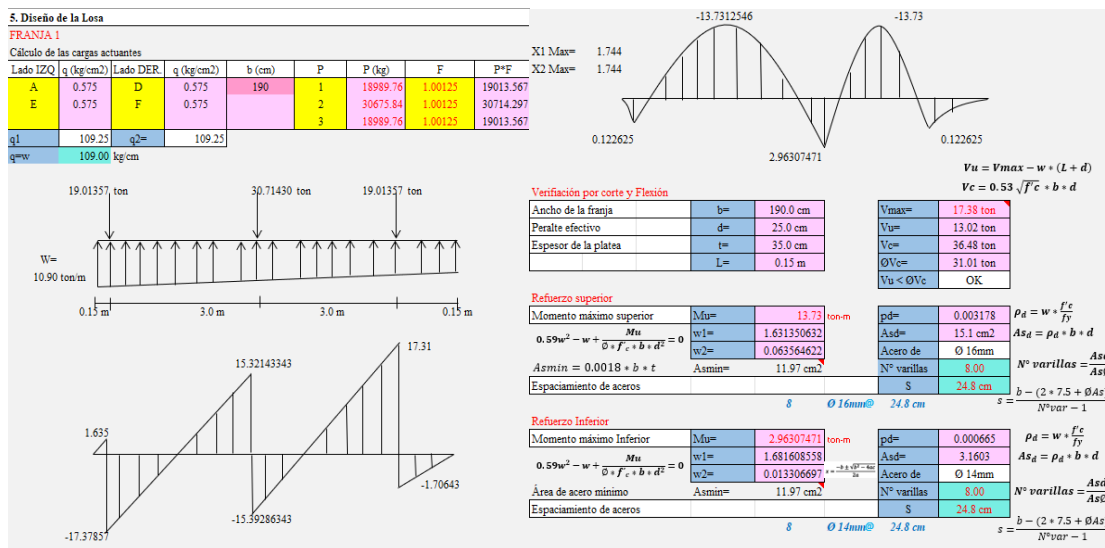
<b>4. Cálculo del factor de amplificación de carga "F" para cada franja</b>								<b>3. Cálculo del Peralte efectivo de la losa apartir del corte por punzonamiento</b>				
FRANJAS	q	q prom	b (cm)	L (cm)	P	zP	CP	F	En las columnas de mayor carga y de menor desarrollo de superficie de punzonamiento			
A	0.575	0.5750	190	630	P1	68655.36	68741.43	1.00125	<b>COLUMNA 5</b>			
B	0.575				P2				Vu = Pu - q <sub>min</sub> * m + n			
C	0.575				P3				Vu = 66105.60 - 0.7325 x( 30 * d ) x( 30 * d ) .....(1)			
D	0.575								Vc = 1.1 * √f'c * b * d			
E	0.575								Vu = 15.941 2 x( 30 * d + 30 * d ) x d .....(2)			
F	0.575								68105.6 - 659.925 - 43.995d - 0.7325d <sup>2</sup> = 1912.9 d 63.7621 d <sup>2</sup>			
G	0.575	0.575	350	630	P4	127457.3	127122.39	1	-64.50 d <sup>2</sup> - 1956.9 d + 65445.63 = 0			
H	0.575				P5				d = $\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$			
I	0.575				P6				d1 = 50.453			
J	0.575								d2 = 20.112			
K	0.575								de = 20 cm			
L	0.575								<b>COLUMNA 2</b>			
A	0.575	0.5750	190	630	P7	68655.36	68741.43	1.00125	Vu = Pu - q <sub>min</sub> * m + n			
B	0.575				P8				Vu = 30675.84 - 0.7325 x( 30 * d ) x( 30 * d/2 ) .....(1)			
C	0.575				P9				Vc = 1.1 * √f'c * b * d			
D	0.575								Vu = 15.941 2 x( 30 * d + 30 * d/2 ) x d .....(2)			
E	0.575								30675.8 - 659.925 - 32.995d - 0.36625d <sup>2</sup> = 1912.9 d 47.8215 d <sup>2</sup>			
F	0.575								-48.19 d <sup>2</sup> - 1945.9 d + 30015.32 = 0			
G	0.575								d = $\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$			
H	0.575								d1 = 52.292			
I	0.575								d2 = 11.912			
J	0.575								de = 12 cm			
K	0.575	0.575	165	730	P1	68655.36	68957.06	1.00439	<b>COLUMNA 1</b>			
L	0.575				P2				Vu = Pu - q <sub>min</sub> * m + n			
A	0.575				P3				Vu = 19889.76 - 0.7325 x( 30 * d/2 ) x( 30 * d/2 ) .....(1)			
B	0.575				P4				Vc = 1.1 * √f'c * b * d			
C	0.575				P5				Vu = 15.941 2 x( 30 * d/2 + 30 * d/2 ) x d .....(2)			
D	0.575				P6				19889.8 - 659.925 - 21.9975d - 0.1833 d <sup>2</sup> = 1912.9 d 31.661 d <sup>2</sup>			
E	0.575				P7				-32.06 d <sup>2</sup> - 1934.9 d + 19329.84 = 0			
F	0.575				P8				d = $\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$			
G	0.575				P9				d1 = -68.688			
H	0.575								d2 = 8.325			
I	0.575								de = 8 cm			
J	0.575								Tomamos el mayor valor de "d" de = 25.0 cm			
K	0.575								ts = d/10			
L	0.575								Verificación de la condición de diseño			

Nota. Hoja de cálculo Excel para el método rígido convencional.

Se diseñaron cada una de las franjas, en este caso ejemplificamos la franja 1 que soporta momentos flectores y esfuerzos cortantes los cuales son soportados por los refuerzos de acero tanto superior como inferior, los cálculos y los diagramas se muestran en la Figura 8.

**Figura 8**

*Diseño de las franjas de la losa*



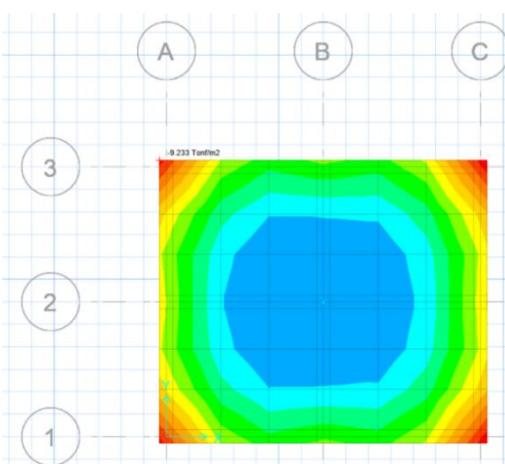
Nota. Hoja de cálculo Excel para el método rígido convencional.

## 2.7 Modelo 2

Después de cargar el modelo con sus respectivas cargas en las columnas que se encuentran en las intersecciones de cada uno de los ejes, se obtuvo que la presión máxima que soporta el suelo en una esquina es de  $9.233 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$  estando por encima de la capacidad de soporte del suelo que es  $9.25 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$ . Considerando que la capacidad de soporte del suelo ya tiene un factor de seguridad de 3 y la presión máxima que se presentó en la losa de cimentación es en la esquina, se acepta este valor y se procedió realizando el modelo, ver Figura 9.

**Figura 9**

*Diagrama de presión sobre el suelo con cargas de servicio*

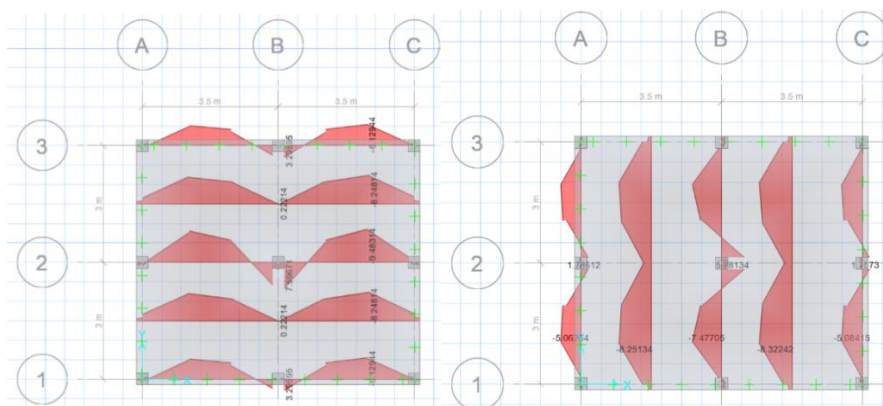


*Nota.* Presión sobre el suelo del método Winkler modelado por elementos finitos.

El cálculo de los momentos flectores se realizó con la carga mayorada para que la cimentación pueda resistir esfuerzos superiores a los que se presentaron con la carga de servicio y se tomaron los valores máximos para distribuir el acero que los va a soportar, ver Figura 10 y Figura 11.

**Figura 10**

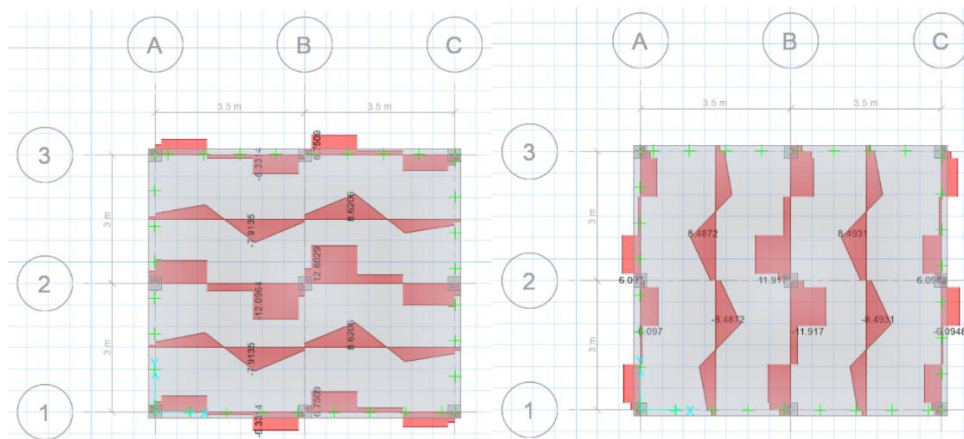
*Diagrama de momentos flectores en sentido X y sentido Y*



*Nota.* Momentos flectores producidos sobre la losa de cimentación del método Winkler modelado por elementos finitos.

**Figura 11**

*Diagrama de esfuerzos cortantes en sentido X y sentido Y*

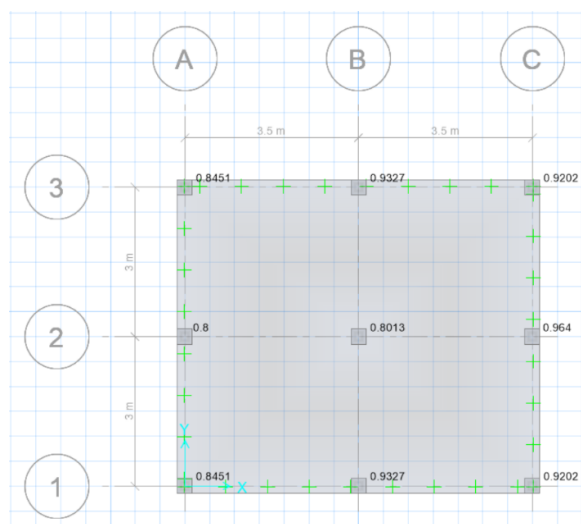


*Nota.* Esfuerzos cortantes producidos sobre la losa de cimentación del método Winkler modelado por elementos finitos.

El diagrama de índice de punzonamiento muestra que todas las columnas están por debajo del índice límite que es 1, lo cual verificó que estas no terminarán punzonando la losa de cimentación, ver Figura 12.

**Figura 12**

*Diagrama de índice de punzonamiento*



*Nota.* Punzonamiento generado por las columnas de la losa de cimentación del método Winkler modelado por elementos.

## Capítulo tres

### Análisis e interpretación de resultados

#### 3.1 Tipo de suelo

Se seleccionó un estudio de suelo que presentaba la particularidad de tener un valor de “N60” en el ensayo SPT  $< 10$  lo cual nos da la certeza de que el suelo presenta las características precisas para considerarse como suelo blando, este es en su mayoría limos “MH”.

#### 3.2 Cargas

Se asumió una carga viva y una carga muerta que va a ser transmitida por cada columna hacia la cimentación considerando una estructura simétrica de 4 pisos. La carga viva se establece en la normativa NEC-SE-CG-2015, siendo esta de 0.20 ton/m<sup>2</sup>. La carga muerta se escogió de manera preliminar considerando el peso propio de losa, vigas y columnas, así como las cargas de mampostería establecidas en la normativa NEC-SE-CG-2015, siendo esta de 0.20 ton/m<sup>2</sup>. Posteriormente se realizó la mayoración con la segunda combinación de cargas de la NEC-SE-CG-2015 con la ecuación (1) del capítulo 2.

De esta manera se obtuvo una CM de 32.688 ton, 19.9632 ton, 13.0248 ton para las columnas centrales, medianeras y esquineras respectivamente; y una CV de 8.4 ton, 4.2 ton y 2.1 ton para las columnas centrales, medianeras y esquineras respectivamente. Estos fueron los valores preliminares en base a los cuales se diseñó la losa de cimentación.

#### 3.3 Parámetros de los modelos

En un análisis computacional previo que se realizó para determinar qué tipo de cimentación superficial se pudo adoptar para estas condiciones, se modelaron cimentaciones

aisladas y también se agregaron vigas arriostradas para observar su comportamiento en este tipo de suelo, pero resultaron inviables por lo cual se optó por diseñar una losa de cimentación.

La profundidad de desplante seleccionada para modelos va a ser a 1.00m de profundidad dado que hasta los 2m de profundidad la capacidad portante del suelo sigue siendo la misma, ver Tabla 1.

Para facilitar el análisis se denotaron a los diseños de la siguiente manera, cada uno de ellos con un peralte de 35cm para cumplir el punzonamiento cuyo valor de control no debe ser superior a 1 y tuvimos uno de 0.96 en la columna más crítica:

### 3.4 Dimensiones

Las dimensiones para la losa de cimentación en un suelo con  $q_{adm} = 9.25 \text{ To/m}^2$  se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Dimensiones para la cimentación*

Sentido	Longitud (m)
Horizontal	6.30
Vertical	7.30

*Nota.* Dimensiones de la losa de cimentación.

### 3.5 Presión sobre el suelo

Para cada modelo se obtuvo la presión de suelo de cada una de las cimentaciones la cual no debía exceder de 9.25 ton/m<sup>2</sup> y se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3***Presión máxima de suelo*

Cimentación	Máy. (ton/m <sup>2</sup> )
Modelo 1	7.33
Modelo 2	9.23

Con estos resultados se asegura que la losa de cimentación va a poder ser soportada por el suelo y no va a hacer que este falle o se hunda causando un colapso con la estructura ya que ambos valores de presión ejercida sobre el suelo no superan el 9.25 ton/m<sup>2</sup> de capacidad de soporte.

### 3.6 Cortantes y momentos

Para cada modelo se tienen los esfuerzos cortantes en una dirección y por punzonamiento, así como los momentos flectores últimos para las cimentaciones aisladas cuadradas con un suelo de  $q_{adm} = 9.25 \text{ ton/m}^2$  y se muestran en la Tabla 4, Tabla 5,

Tabla 6, Tabla 7.

**Tabla 4***Cortantes y momentos máximos en sentido X modelo 1*

Columna	Cortante 1 dirección (ton)	Momento flector (ton*m)
Interior	19.62	23.41
Medianera	13.02	13.73
Esquinera	1.64	0.12

**Tabla 5***Cortantes y momentos máximos en sentido Y modelo 1*

Columna	Cortante 1 dirección (ton)	Momento flector (ton*m)
Interior	21.16	22.60
Medianera	14.24	16.29
Esquinera	2.59	0.11

**Tabla 6***Cortantes y momentos máximos en sentido X modelo 2*

Columna	Cortante 1 dirección (to)	Momento flector (ton*m)
Interior	12.80	9.48
Medianera	6.75	6.13
Esquinera	1.66	0.15

**Tabla 7***Cortantes y momentos máximos en sentido Y modelo 2*

Columna	Cortante 1 dirección (ton)	Momento flector (ton*m)
Interior	11.91	8.32
Medianera	6.10	5.08
Esquinera	3.14	0.13

Todos estos son valores máximos que soportaron cada una de las columnas para el modelo 1 y 2. No existen valores límite para cortantes y momentos, pero dichos requerimientos van a tener que ser cubiertos por los esfuerzos que soportan el concreto y el acero de refuerzo.

### 3.7 Resumen de acero y espesor

El resultado del acero para la losa de cimentación diseñada sobre un suelo con un  $q_{adm} = 9.25 \text{ ton/m}^2$  se muestran en la Tabla 8 y Tabla 9, y la Figura 11 y Figura 12.

**Tabla 8**

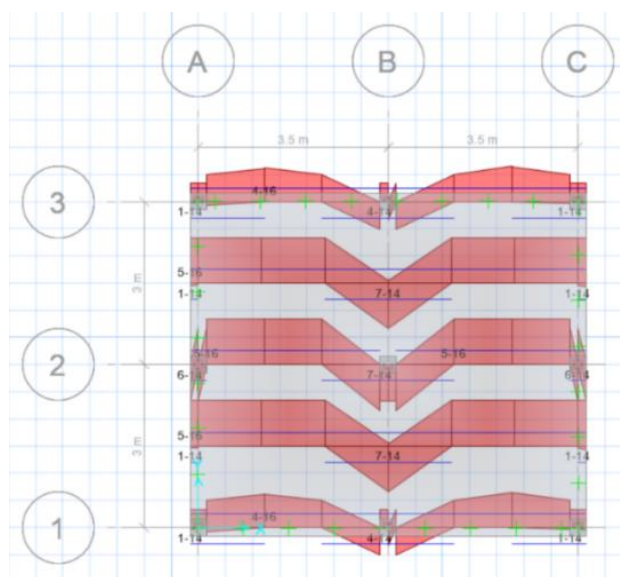
*Resumen de acero y espesor obtenidos para el modelo 1*

Franja	Malla inferior			Malla superior		
	Sep. (cm)	D. (mm)	# Var	Sep. (cm)	D. (mm)	# Var
1	24.80	14	8	24.80	16	8
2	25.70	14	14	27.80	16	13
3	6.20	14	29	7.90	16	23
4	24.80	14	7	18.60	16	9
5	25.80	14	12	25.80	16	12
6	22.30	14	7	14.80	16	10

*Nota.* Distribución del acero para la malla superior e inferior.

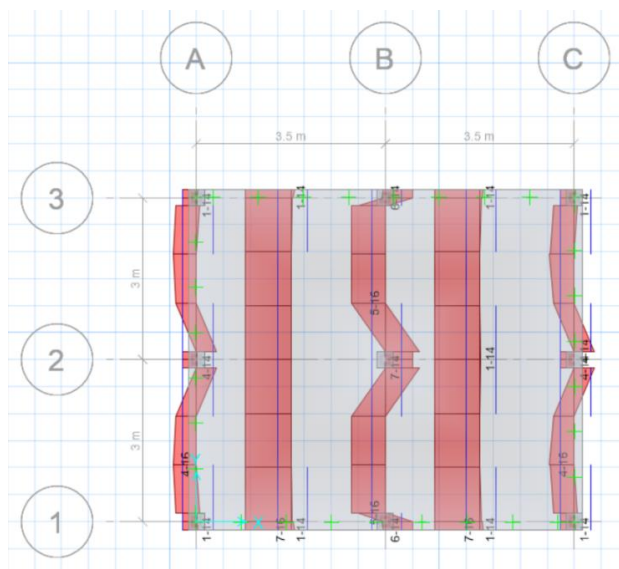
**Figura 13**

*Franjas de diseño para losa de cimentación, método Winkler mediante elementos finitos en sentido X*



**Figura 14**

*Franjas de diseño para losa de cimentación, método Winkler mediante elementos finitos en sentido Y*

**Tabla 9**

*Resumen de acero y espesor obtenidos para el modelo 2*

Franja	Malla inferior			Malla superior		
	Sep. (cm)	D. (mm)	# Var	Sep. (cm)	D. (mm)	# Var
1	37.50	16	4	37.50	14	4
2	30.00	16	5	21.43	14	7
3	30.00	16	5	21.43	14	7
4	30.00	16	5	21.43	14	7
5	37.50	16	4	37.50	14	4
6	35.00	16	4	35.00	14	4
7	20.00	16	7	70.00	14	2
8	28.00	16	5	20.00	14	7
9	20.00	16	7	70.00	14	2
10	35.00	16	4	35.00	14	4

*Nota.* Distribución del acero para la malla superior e inferior.

## Conclusiones

La profundidad de desplante máxima que se puede seleccionar para este tipo de suelo es de 2m, debido a que en los estratos inferiores el valor de  $N_{60}$  es mayor a 10 por lo cual su comportamiento ya no es el de un suelo blando.

El peralte efectivo para evitar el punzonamiento en ambos modelos es de 35cm, no se consideró inferior para evitar el punzonamiento.

El modelo 1 correspondiente al método convencional llega a tener una presión sobre el suelo de  $7.33 \text{ ton/m}^2$ , alcanzando un 79.24% de la capacidad admisible del suelo mientras que el modelo 2 correspondiente al método Winkler modelado por elementos finitos llega a tener una presión sobre el suelo de  $9.23 \text{ ton/m}^2$ , alcanzando un 99.78% de la capacidad admisible del suelo. Considerando que el estudio de suelos ya tiene un factor de seguridad de 3, ambos valores están dentro de un rango aceptable, considerando la seguridad de la estructura.

Según la NEC-SE-CM 2015 el asentamiento máximo permisible para la luz crítica de 3.5m de este modelo de edificación es 1.167cm, se obtuvo un asentamiento de 0.394cm para los modelos 1 y 2 lo cual es aceptable ya que se encuentra en un 33.79% del máximo permisible.

El método rígido convencional presentó valores de esfuerzos cortantes y momentos flectores mayores a los del método Winkler modelado mediante elementos finitos. El cortante crítico para el modelo 1 es de 21.16 ton y el momento flector crítico es de 23.41 ton\*m. El cortante crítico para el modelo 2 es de 12.80 ton y el momento flector crítico es de 9.48 ton\*m. Se denota una clara diferencia entre estos dos métodos, considerar el suelo como una masa rígida (método convencional) y modelar al suelo mediante un modelo elástico (elementos finitos).

En los modelos computacionales se evidenció una diferencia notable en el acero de refuerzo, siendo mayor la cantidad de acero solicitado por el método rígido convencional donde se obtuvo un valor de 1532.82kg de acero y en el método Winkler modelado mediante elementos finitos se obtuvo un valor de 987.31kg de acero. El método rígido convencional tiene un 35.59% más de kg de acero requerido que el método Winkler modelado mediante elementos finitos.

Tomando en consideración los modelos realizados, el método Winkler modelado mediante elementos finitos presenta un valor más eficiente y óptimo en cuestión de acero, además el modelo cumple con la capacidad de carga del suelo y también pasa el punzonamiento como se puede ver en la Figura 11.

## Recomendaciones

Realizar un cambio del estrato del suelo con material de mejoramiento siempre que sea posible, tomando en consideración que las capas a ser reemplazadas no superen la capacidad admisible de los estratos en niveles inferiores.

En los modelos de prueba para cimentaciones aisladas y con vigas arriostradas, el suelo blando "MH" utilizado para este estudio falla principalmente por capacidad de carga antes que por esfuerzo cortante o punzonamiento, por dicha razón esos modelos no se incluyen en el presente estudio, ya que no son viables.

La forma de estimar el módulo de balasto de una tipología de suelo en particular sería más precisa mediante ensayos de laboratorio antes que tomar valores estimados en tablas a partir de su capacidad portante.

El chequeo de la presión del suelo se debe realizar siempre bajo cargas de servicio para no sobredimensionar la estructura mientras que para calcular los esfuerzos que va a soportar la estructura si se utiliza la carga mayorada.

## Referencias

- Arthur H. Nilson. (2001). Sistemas de construcción para edificios de concreto. In *Diseño de estructuras de concreto*.
- Avilés, J. (1999). *INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA: CONCEPTOS DE DISEÑO*.
- Briones, M. E., & Irigoin, N. U. (2015). *Zonificación Mediante El Sistema Unificado De Clasificación Facultad De Ingeniería Carrera De Ingeniería Civil*.  
[http://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/6679/Briones Alva%20María Emérita Irigoin Gonzales%20Nelson Ulices.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/6679/Briones%20Alva%20María%20Emérita%20Irigoin%20Gonzales%20Nelson%20Ulices.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Crespo, C. (2004). *MECÁNICA DE SUELOS Y CIMENTACIONES*.
- Das, B. M. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones* (C. Learning (ed.); 7th ed.).
- Das, B. M. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (4ta ed., Issue I).
- Espinosa Stead, A. J., & Carrión Granja, J. P. (2019). *Influencia de la interacción suelo–estructura de cimentaciones superficiales en suelos no cohesivos en el comportamiento estructural de una edificación de 8 pisos y un subsuelo*.
- Fernández Gálvez, R. A. (2015). Capacidad Portante con Fines de Cimentación Mediante los Ensayos SPT Y Corte Directo en el Distrito de Aguas Verdes- Tumbes. In *Universidad Nacional de Cajamarca*. [http://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/UNC/1640/TESIS RFG 2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/UNC/1640/TESIS%20RFG%202015.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Freire Tellado, M. J. (1999). Recommendations for the use of the coefficient of subgrade reaction. *Informes de La Construcción*, 51(463), 23–35.
- García, O. (2017). *Modelo de capacidad portante para arcillas mejoradas con rellenos*

*granulares.*

Garza, L. (2004). *Diseño y construcción de cimentaciones*. 1–201.

Gavilanes, K. (2019). *Facultad De Ingeniería Civil Carrera De Ingeniería Civil Machala 2019*. 1–170. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/15069>

Guerra, M. (2013). *-Diseno-de-Cimentaciones-Sismo-Resistentes-Utilizando-SAFE-1e-Ing-Marcelo-Guerra-pdf.pdf*.

McCorman, J. (2011). *Diseño de concreto reforzado* (M. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. & I. 978-607-707-231-7 (eds.); Octava Edi).

Morales, L., & Espinosa, A. (2020). Influencia de la Interacción Suelo Estructura (ISE) de Cimentaciones Superficiales en Suelos no Cohesivos en el Comportamiento Estructural de una Edificación de 8 Pisos y un Subsuelo. *Ingenio*, 3(1), 5–26. <https://doi.org/10.29166/ingenio.v3i1.2391>

Organización Internacional del Trabajo. (2017). Manual de referencia Sindical sobre la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. In *Organización Internacional del Trabajo* (Vol. 1). [http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/@ed\\_dialogue/@actrav/documents/publication/wcms\\_569914.pdf](http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/@ed_dialogue/@actrav/documents/publication/wcms_569914.pdf)

Roldán de Paz, J. (2010). *Estabilización de suelos con cloruro de sodio (NaCl) para bases y sub bases*. 199. [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_3160\\_C.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3160_C.pdf)

Soriano, A. (1989). Interacción suelo-estructura: modificación del movimiento. *Física de La Tierra*, 0(1), 287. [https://doi.org/10.5209/rev\\_FITE.1989.n1.13468](https://doi.org/10.5209/rev_FITE.1989.n1.13468)

Toapanta Tixilema, H. F. (2016). *INTERACCIÓN SÍSMICA ENTRE SUELOO-ESTRUCTURA*

*EN EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO DE 6 PISOS LIMITADOS POR ZAPATAS AISLADAS EN LA CIUDAD DE AMBATO SECTOR PLAZA URBINA (Vol. 1).*

Turcios Medina, D. A. (2020). *Comparación de diseño estructural para cimentaciones superficiales utilizando el método rígido convencional y el método Winkler por elementos finitos Abstract Resumen.*

Valderrama Carpio, C. J., & Meza Rodríguez, J. A. (2014). *Influencia de la Interacción Suelo-Estructura en la Reducción de Esfuerzos en una Edificación Aporticada con Zapatas Aisladas.* In *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.*  
<http://hdl.handle.net/10757/346266>

Villarreal Castro, G. (2009). *INTERACCION SISMICA SUELO ESTRUCTURA EN EDIFICACIONES CON ZAPATAS AISLADAS.*

## Apéndices

### Apéndice A

#### *Módulo de Balasto*

Esf. adm (ton/m <sup>2</sup> )	K (ton/m <sup>2</sup> )	Esf. adm (ton/m <sup>2</sup> )	K (ton/m <sup>2</sup> )
2.50	650	13.00	2740
3.00	780	13.50	2830
3.50	910	14.00	2920
4.00	1040	14.50	3010
4.50	1170	15.00	3100
5.00	1300	15.50	3190
5.50	1390	16.00	3280
6.00	1480	16.50	3370
6.50	1570	17.00	3460
7.00	1660	17.50	3550
7.50	1750	18.00	3640
8.00	1840	18.50	3730
8.50	1930	19.00	3820
9.00	2020	19.50	3910
9.50	2110	20.00	4000
10.00	2200	20.50	4100
10.50	2290	21.00	4200
11.00	2380	21.50	4300
11.50	2470	22.00	4400
12.00	2560	22.50	4500
12.50	2650	23.00	4600

*Nota.* Módulo de balasto en base a la capacidad admisible del suelo [tabla], por (Guerra, 2013).