

Comparación de diseño estructural para cimentaciones superficiales utilizando el método rígido convencional y el método Winkler por elementos finitos

Abstract

The main objective of this project is to determine if there is a difference in the design and construction costs of isolated square foundations for buildings between 2 and 5 stories high by using two different analysis methodologies and two different types of soils.

To carry out the objective, the results of the efforts of the foundations obtained through the 2 methods and in each of the soils were collected. Through a bibliographic review, the procedures for the design of each of the foundations were obtained. Concepts from the budget portion were also used to quantify the construction costs associated with each foundation.

In the development of the project, it is determined that, for buildings of 2 stories high, although there are differences in the magnitudes of the efforts, this difference is not reflected in construction costs, on the other hand, for buildings greater than 4 stories of height if there is a significant difference in costs of around 8% or more when the rigid conventional method is used instead of the soil-structure interaction method. For the 3-story buildings, a conclusion could not be reached as there was no significant number of foundations.

Keywords: comparison, isolated foundations, rigid conventional, Winkler, costs, design.

Resumen

El objetivo principal de este proyecto es el determinar si existe una diferencia en el diseño y costos constructivos de cimentaciones aisladas cuadradas para edificios de entre 2 y 5 pisos de altura al usar dos metodologías diferentes de análisis y dos distintos tipos de suelos.

Para llevar a cabo el objetivo se recopilieron los resultados de los esfuerzos de las cimentaciones obtenidos a través de los 2 métodos y en cada uno de los suelos. Mediante una revisión bibliográfica se obtuvieron los procedimientos para el diseño de cada una de las cimentaciones. También se utilizaron conceptos de la parte de presupuestos para cuantificar los costos constructivos asociados a cada cimentación.

En el desarrollo del proyecto se determina que, para edificios de 2 pisos de altura, aunque se presenten diferencias en las magnitudes de los esfuerzos, esta diferencia no se ve reflejada en los costos de construcción, en cambio, para edificios mayores a 4 pisos de altura si se llega presentar una diferencia significativa en los costos de alrededor 8% o más cuando se utiliza el método convencional rígido en vez del método de interacción suelo-estructura. Para los edificios de 3 pisos no se pudo llegar a una conclusión ya que no se contó con la una cantidad significativa de cimentaciones.

Palabras clave: comparación, cimentaciones aisladas, convencional rígido, Winkler, costos, diseño.

Comparación de diseño estructural para cimentaciones superficiales utilizando el método rígido convencional y el método Winkler por elementos finitos

Comparación de diseño estructural para cimentaciones superficiales utilizando el método rígido convencional y el método Winkler por elementos finitos

DAVID ANTONIO TURCIOS MEDINA

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Julio del 2020

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Miguel Peralta Salas, Ing. Mauricio Carranza Solano, Ing Sonia Vargas Calderón, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

GUSTAVO
ADOLFO
ROJAS
MOYA
(FIRMA)

Firmado
digitalmente por
GUSTAVO
ADOLFO ROJAS
MOYA (FIRMA)
Fecha: 2021.04.29
12:01:25 -06'00'

Ing. Gustavo Rojas Moya.
Director



Ing. Miguel Peralta Salas.
Profesor Guía

MAURICIO
CARRANZA
SOLANO (FIRMA)

Firmado digitalmente por
MAURICIO CARRANZA
SOLANO (FIRMA)
Fecha: 2021.04.29 15:34:37
-06'00'

Ing. Mauricio Carranza Solano.
Profesor Lector

SONIA VARGAS
CALDERON
(FIRMA)

Firmado digitalmente
por SONIA VARGAS
CALDERON (FIRMA)
Fecha: 2021.04.29
11:28:01 -06'00'

Ing. Sonia Vargas Calderón.
Profesora Observadora

Contenido

	PREFACIO	1
	RESUMEN EJECUTIVO.....	2
	INTRODUCCIÓN.....	4
	MARCO TEÓRICO	4
	METODOLOGÍA.....	25
MODELACIÓN CONSIDERANDO Y NO LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA		27
	RESULTADOS	43
	ANÁLISIS DE RESULTADOS	68
	CONCLUSIONES.....	72
	RECOMENDACIONES.....	73
	APÉNDICES	74
	ANEXOS.....	87
	REFERENCIAS	105

Prefacio

El tema desarrollado en el presente proyecto corresponde a la comparación entre metodologías para el análisis de cimentaciones cuadradas aisladas, así como la investigación acerca del comportamiento de este tipo de estructuras desde un punto de vista geotécnico, estructural y de costos.

El proyecto presenta su justificación en la necesidad de poner a disposición de la comunidad ingenieril de Costa Rica con base en resultados, si es factible económicamente el utilizar la metodología que toma en cuenta la interacción suelo-estructura (Winkler usando funciones de impedancia) para realizar el análisis estructural de cimentaciones aisladas, para posteriormente hacer el diseño. Debido a que esta metodología conlleva a una mayor demanda durante el análisis en comparación al método convencional rígido.

Agradecimientos

Aunque estas pocas palabras no pueden plasmar de manera adecuada mi gratitud. En primera instancia agradezco a Dios por permitirme llegar a este punto de mi vida, donde culminó un largo camino de estudio para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción. Agradezco enormemente a mi familia y amigos por brindarme su apoyo constantemente. Gracias al profesor e ingeniero Miguel Peralta Salas por su valiosa guía y ayuda durante la realización y conclusión de este proyecto.

Resumen ejecutivo

El proyecto realizado radicó en una serie de labores puntuales, todas orientadas a determinar las diferencias en cimentaciones cuadradas aisladas para edificios de 2 a 5 pisos de altura al ser analizadas a través de una metodología que considera la interacción suelo-estructura (Winkler usando funciones de impedancia) versus una metodología que no la considera (convencional rígido). Con el fin de determinar cómo afecta en el diseño y a su vez en los costos de construcción de estas

Una cimentación aislada es una estructura que brinda soporte a columnas o pilares que transmiten cargas concentradas en una mayor área, el objetivo del proyecto es mediante los resultados obtenidos, realizar una comparación entre los dos métodos de análisis para la modelación de cimentaciones aisladas cuadradas.

Para la realización del proyecto, se dispuso de bibliografía para encontrar las propiedades mecánicas que representarían los dos suelos propuestos, como lo son el módulo de Poisson, módulo de reacción o coeficiente de balastro, velocidad de onda de corte entre otros. Para los suelos se propuso uno con capacidad admisible baja de 10 Ton/m² y otro de capacidad admisible alta con un valor de 30 10 Ton/m².

Una vez escogidos los suelos, a partir de los modelos de los edificios en SAP 2000 que fueron proporcionados por el profesional guía, a estos se le introducen las combinaciones de cargas que se presentan en el apartado de "Factores de Cargas" en la sección del marco teórico. Introducidas las combinaciones, se dispone a correr los modelos y se obtienen los esfuerzos en las bases de las columnas donde se sitúan las cimentaciones por utilizar para este proyecto. A partir de los esfuerzos obtenidos, se utilizan los resultados de las combinaciones de servicio estática y dinámica para la determinación de las dimensiones L y B de las cimentaciones. Con los resultados de las combinaciones de las solicitaciones últimas estáticas y dinámicas, se obtienen los esfuerzos de mayor magnitud para

posteriormente ser cargados sobre los modelos de cada una de las cimentaciones.

Una vez obtenidas las dimensiones L y B, así como los esfuerzos que serán cargados sobre la estructura de las cimentaciones. Se procede primero a la modelación de las cimentaciones mediante el método de interacción de suelo-estructura (Winkler). Debido a que el método Winkler representa al suelo como una cama de resorte, sin embargo, lo hace a partir de la rigidez (que depende del coeficiente de balastro) del suelo sin tomar en cuenta las características propias que definen a cada suelo. Por tanto, se utilizaron las funciones de impedancia de "Gazetas" para representar el comportamiento del suelo, cuyas fórmulas se encuentran representadas a partir de la figura 11 hasta la 14.

A partir de las funciones de impedancia se obtuvieron los valores de rigidez traslacional (vertical) y rotacionales en "x" y "y" para cada uno de los tres tipos de resortes que poseen las cimentaciones (central, lateral y esquinero), esto se llevó a cabo en cada uno de los dos suelos propuestos. Obtenidas las rigideces se modelaron en SAP 2000 las cimentaciones por el método de elementos finitos y se corrieron para determinar los esfuerzos internos de cada una de las cimentaciones. Una vez obtenidos los esfuerzos se procedió a realizar el diseño, con la guía del libro de "Diseño de concreto reforzado" de McCormac el cual es basado en la norma ACI 318-19, así como también con las indicaciones del CSCR-10.

Una vez diseñadas las cimentaciones se procedió al cálculo del costo vinculado a los materiales y mano de obra necesarios para llevar a cabo la construcción de cada cimentación. Los precios de los materiales fueron consultados en la tienda online de Construplaza y vía teléfono al Grupo Orosi, en cuanto a los rendimientos de mano de obra se consultó bibliografías referentes a rendimientos. Los costos de la mano de obra se calcularon a partir de la conformación de las cuadrillas para cada actividad vinculada al proceso de construcción. Los salarios mínimos fueron obtenidos del Ministerio de Trabajo y Seguridad Social (MTSS). Todo lo mencionado se encuentra representado en un ejemplo hecho para una cimentación en la sección de "Modelación considerando y no la interacción suelo -estructura"

Una vez finalizado el análisis y diseño de las cimentaciones a través del método de interacción suelo-estructura, se prosiguió a

² Comparación de diseño estructural para cimentaciones superficiales utilizando el método rígido convencional y el método Winkler por elementos finitos.

realizarlo por el método convencional rígido. Los pasos son similares a los mencionados en el primer método, sin embargo, se diferencia que, durante la modelación de las cargas, estas se introducen en el modelo de SAP 2000 en forma de sobrepresión, esto se llevó a cabo en cada uno de los dos suelos propuestos. Una vez modeladas se obtienen los esfuerzos internos de momentos y cortante y se realiza el diseño de la misma forma que el primer método. Diseñadas las cimentaciones se realiza el mismo cálculo de los costos que se realizaron para las cimentaciones en el primer método. Todo lo mencionado se encuentra representado en un ejemplo hecho para una cimentación en la sección de “Modelación considerando y no la interacción suelo-estructura”.

Finalmente, con los resultados de los esfuerzos y costos constructivos para cada cimentación a través de las dos metodologías y los dos tipos de suelos propuestos, se realizó un análisis para determinar la forma en que varían los esfuerzos y costos al implementar el uso de un método que considera la interacción suelo-estructura y otro que no lo hace. Con lo cual se llega a cumplir el objetivo de este proyecto. Donde para los edificios de 2 pisos de altura es irrelevante el tipo de método (ISE o convencional) o suelo que se utilice ya que no hay ningún impacto en lo respectivo a los costos de construcción. Esto es debido a que por ser edificios con esfuerzos de cortantes y momentos relativamente bajos, al momento del diseño terminan dentro de los parámetros mínimos.

Por otro lado, a partir de edificios de 4 pisos se comienza a evidenciar un aumento significativo en los costos para la construcción de cimentaciones en ambos suelos cuando, cuando se usa el método convencional rígido para el análisis. Los aumentos de costos son inversamente proporcionales a la capacidad admisible del suelo. Dando diferencias de más del 3% para edificios de 4 pisos de altura y más del 8% para edificios de 5 pisos de altura en el suelo de 30 Ton/m² de capacidad admisible. Y de más del 5% para edificios de 4 pisos de altura y más del 12% para edificios de 5 pisos de altura en el suelo de 10 Ton/m² de capacidad admisible.

³ Comparación de diseño estructural para cimentaciones superficiales utilizando el método rígido convencional y el método Winkler por elementos finitos.

Introducción

Las cimentaciones son uno de los elementos más importantes para las edificaciones ya que estas transfieren las cargas de la estructura al suelo; por tal motivo, es importante realizar un adecuado análisis y diseño estructural para limitar en la mayor medida posible los asentamientos que sufran las edificaciones al realizar el diseño óptimo de las cimentaciones. Existen variadas metodologías para llevar a cabo el análisis de diseño, unas más recientes que otras. Diversos proyectos de investigación se han realizado en busca de una comparación entre metodología y determinar cuál es la menos conservadora. Entre los más recientes relacionados al anteproyecto presente se encuentra la tesis: "Comparación de metodologías de análisis en el diseño geotécnico-estructural de cimentaciones superficiales en depósitos blandos" realizada por los estudiantes Escobar Guerra Zoila María y Guim Moreira María Meyleen que optaban por el título de ingeniería civil de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil en Ecuador durante el período del 10 de setiembre del año 2019.

El trabajo consiste en el diseño geotécnico y estructural y comparaciones de resultados de cimentaciones superficiales con una zapata aislada, una zapata corrida y una losa de cimentación. El trabajo considera para el análisis y diseño de la cimentación un Edificio Administrativo de hormigón armado de dos plantas con un área de 324 m². La metodología aplicada para la realización del trabajo fue, en primer lugar, la idealización del perfil de suelo con sus respectivos parámetros. Posteriormente, se realizó el diseño geotécnico y estructural de las cimentaciones superficiales con: una zapata aislada, una zapata corrida y una losa de cimentación usando tres metodologías de análisis: (1) convencional, (2) cimentación tipo Winkler y (3) análisis de elementos finitos. Se utilizó el software SAP 2000 para simular el comportamiento del suelo como resortes lineales, luego se realizó un modelo en PLAXIS 3D con base en elementos finitos para

obtener la respuesta del suelo en función del perfil geotécnico y sus características.

Posteriormente, se comparó de manera cualitativa y cuantitativa los resultados obtenidos de cada uno de los métodos donde se obtienen valores de las deformadas y los momentos flectores y se concluye que el método convencional al no considerar la rigidez del suelo, los valores de momentos flectores son mayores y como consecuencia hace que el método sea conservador y sobrestime los resultados. A su vez concluyen que el método de Winkler considera un valor constante de coeficiente de balastro para el suelo bajo la superficie del cimiento sin tomar en cuenta las características y el comportamiento de los suelos subyacentes. El comportamiento del suelo es generalmente más complicado de lo que se asume o se simplifica en el cálculo de tensiones por medio de la teoría del módulo de balastro.

El presente proyecto, llamado "*Comparación de diseño estructural para cimentaciones superficiales utilizando el método rígido convencional y el método Winkler por elementos finitos*" presenta similitudes en cuanto a los métodos que se utilizaron para analizar las cimentaciones, ya que se utilizó el método de Winkler para considerar la interacción suelo estructura y el método convencional rígido que no toma en consideración la interacción suelo-estructura. Sin embargo, el presente proyecto se diferencia el método Winkler usado, debido a que en este proyecto mediante las ecuaciones de impedancia de Gazetas, se toma en cuenta las características del suelo y se representan en forma de coeficiente de rigidez para los resortes de las cimentaciones modelados en SAP 2000 para simular de forma más cercana a la realidad el comportamiento del suelo con la estructura.

El proyecto ejecutado se justifica en la necesidad realizar un contenido útil para la comunidad ingenieril de Costa Rica donde con base en resultados, se puede tomar la decisión sobre la factibilidad económicamente al utilizar la metodología que toma en cuenta la interacción suelo-estructura (Winkler usando funciones de impedancia) para realizar el análisis estructural de cimentaciones aisladas para edificios mayores o iguales a 2 pisos de altura, para posteriormente hacer el diseño. Debido a que esta metodología conlleva a una mayor demanda durante el análisis en comparación con el método convencional

rígido. A continuación, se describe explícitamente los objetivos de este proyecto.

Objetivo General

Realizar un estudio comparativo del diseño de cimentaciones superficiales sobre 2 tipos de suelos con capacidades portantes alta (30 Ton/m²) y baja (10 Ton/m²), a través del método rígido convencional y el método de Winkler.

Objetivos específicos

- Obtención de las cargas actuantes sobre las cimentaciones a partir de los modelos en SAP 2000 de cada edificio.
- Utilizar el método de Winkler de interacción suelo-estructura para la modelación de las placas de cimentación superficial de los edificios seleccionados, mediante un modelo planteado en un programa de análisis estructural utilizando la metodología de elementos finitos (MEF), para obtener los esfuerzos internos de cortante y momento de las cimentaciones.
- Utilizar el método rígido convencional para la modelación de las placas de cimentación de los edificios seleccionados, mediante un modelo planteado en un programa de análisis estructural utilizando la metodología de elementos finitos (MEF), para obtener los esfuerzos internos de cortante y momentos de las cimentaciones.
- Diseño de las cimentaciones siguiendo la guía ACI 318-19 y el Código Sísmico de Costa Rica 2010 (CSCR-2010) para el método rígido convencional y el método Winkler.
- Realizar un análisis comparativo para determinar la existencia significativa de diferencias tanto cualitativas como cuantitativas, así como de costos entre los métodos usados para el análisis y diseño de cimentaciones superficiales.

Para desarrollar el marco teórico de este trabajo, se requirió de una investigación sobre temas que se deben de conocer previamente para llevar a cabo su desarrollo. Con respecto a la parte de

geotecnia se consultó el “Braja Das”, el CCCR-2009 así como otras bibliografías referentes a las características de los suelos. Con respecto a las funciones estas se obtuvieron partir del informe realizado por la National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP) para el Laboratorio del Institute of Standards and Technology (NIST) del gobierno de USA. En este informe se describen técnicas específicas mediante las cuales se pueden simular fenómenos SSI en la práctica de la ingeniería, y se proporcionan recomendaciones para modelar los efectos de interacción sísmica suelo-estructura en las estructuras de los edificios.

Para llevar a cabo el análisis estructural se implementó el programa de simulación SAP 2000. Para el diseño estructural se contó con las especificaciones mencionadas en el CSCR-10 y la norma del ACI 318-19. Para los costos de construcción se utilizó bibliografía referente a rendimientos de mano, los precios de los materiales fueron obtenidos a través de la tienda online Construplaza. A partir de los resultados de esfuerzos y costos se realizó la comparación entre los resultados llegando a concluir que para edificios de 2 pisos de altura es irrelevante el tipo de método (ISE o convencional) o suelo que se utilice ya que no hay ningún impacto en lo respectivo a los costos de construcción, debido a que por ser edificios con esfuerzos de cortantes y momentos relativamente bajos, al momento del diseño terminan dentro de los parámetros mínimos. Por otro lado, en edificios que parten de los 4 pisos de altura se comienza a evidenciar un aumento significativo en los costos para la construcción de cimentaciones en ambos suelos cuando se usa el método convencional rígido para el análisis.

² Comparación de diseño estructural para cimentaciones superficiales utilizando el método rígido convencional y el método Winkler por elementos finitos.

Marco teórico

Cimentación

Según el Código de Cimentaciones de Costa Rica (CCCR-2009) la cimentación “es el elemento soportante de una estructura. Donde no solo incluye la parte estructural que transmite la carga de la superestructura al suelo (placa), sino también al suelo o la roca soportante”. Las cimentaciones se clasifican dependiendo de su profundidad en superficiales, profundas y semi profundas.

Cimentaciones superficiales

Se define cimentaciones superficiales a aquellas cimentaciones las cuales la relación Df/B (Df = nivel de desplante, B = ancho del cimiento) es menor o igual que 1. “Las cimentaciones superficiales suelen utilizarse cuando existe poca profundidad en el terreno, una capa resistente como para soportar el peso de la estructura, en condiciones estables de seguridad y con asentamientos o movimientos admisibles” (Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009).

Dependiendo la importancia de la edificación o la capacidad de soporte de suelo, se utilizan distintos tipos de cimentaciones superficiales: placas individuales (o aisladas), placas corridas, placas combinadas o losas de cimentación.

Placas individuales o aisladas

La utilización de las placas individuales es para brindar soporte a columnas o pilares que transmiten cargas concentradas. Consisten en losas de concreto, cuya geometría es usualmente cuadrada, rectangular o en algunos casos circulares, y cumplen la función de repartir la carga sobre un área mayor.

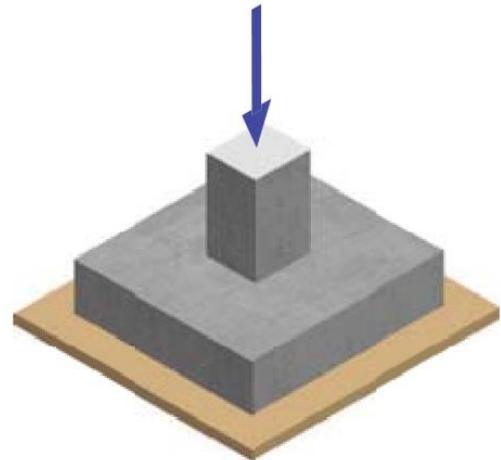


Figura 1, Placa aislada. Fuente: (America Concrete Institute, 2019).

Placas combinadas

Las placas combinadas se implementan cuando existe la cercanía entre dos columnas o cuando una de ellas se ubica en el límite de propiedad del terreno, de tal manera que la fusión entre ambas placas contrarresta la excentricidad de estas. En la siguiente figura se representa una placa combinada:

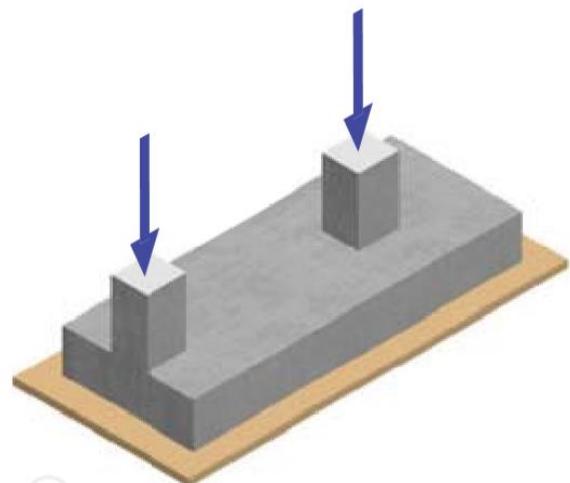


Figura 2. Placa combinada. Fuente: (America Concrete Institute, 2019).

4 Comparación de diseño estructural para cimentaciones superficiales utilizando el método rígido convencional y el método Winkler por elementos finitos.

Placas corridas

Este tipo de cimentaciones es comúnmente usado en las fundaciones de muro de carga portantes. En la siguiente se puede apreciar lo antes mencionado:

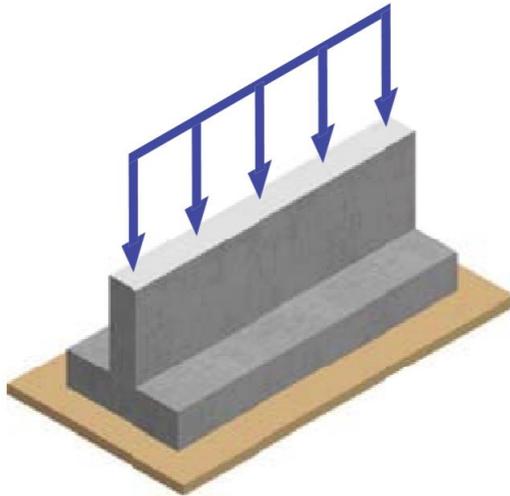


Figura 3. Placa corrida. Fuente: (America Concrete Institute, 2019).

Losas de cimentación

Este tipo de cimentación es implementada cuando el área de soporte requerida es mayor al 60%. Por lo tanto, suelen disponer de un área continua que puede abarcar total o parcialmente el área del edificio. Suelen utilizarse usualmente para la cimentación en zonas donde los suelos son muy blandos o sueltos o en el caso de edificios de gran altura donde, donde la utilización de otros sistemas genera un traslape de áreas de fundación. La figura siguiente es una representación de losa de cimentación:

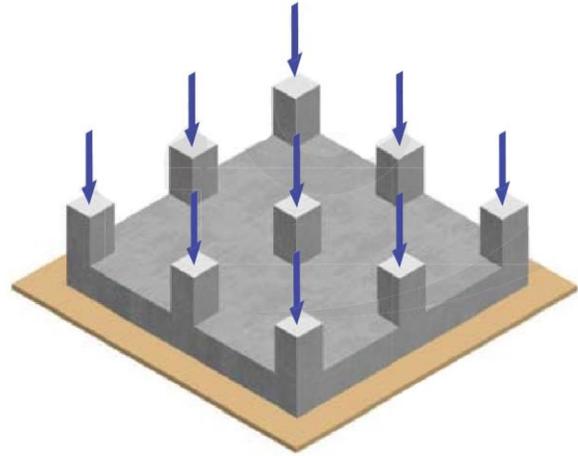


Figura 4. Losa de cimentación. Fuente: (America Concrete Institute, 2019).

Capacidad de soporte del suelo

La capacidad de soporte del suelo o también llamada capacidad última de carga se define como, la presión o carga máxima que puede soportar el suelo sin que esta sufra daños o asentamientos excesivos. Debido a que si se supera este valor el suelo fallará, presentando grietas u otras deformaciones los cuales pueden comprometer la integridad de la edificación que soportan.

La determinación de la capacidad de soporte se realiza a través de la ecuación 4.2 del CCCR-2009, como se representa a continuación que fue propuesta por Terzaghi (1943):

$$q_{\text{últ}} = \frac{\gamma_1 B}{2} N_\gamma + c N_c + \gamma_2 D_f N_q \quad (\text{ec.1})$$

Donde:

$q_{\text{últ}}$ = Capacidad de soporte última (ton/m²).

B = Ancho mínimo de la cimentación (m).

c = Cohesión del material (ton/m²).

γ_1 = Peso volumétrico del suelo por debajo del nivel de desplante (ton/m³).

γ_2 = Peso volumétrico del suelo por debajo del nivel de desplante (ton/m³).

D_f = Nivel de desplante (en caso de sótanos usar la mínima) (m).

N_γ, N_c, N_q = Factores de capacidad de carga.

La ecuación 1, está conformada por tres términos, “el primero que hace referencia a la resistencia para soportar cargas, debido a la geometría de la sección, el segundo a la resistencia producto de la cohesión de las partículas del suelo, y el tercero se refiere a la resistencia debida a la profundidad a la que se encuentra la cimentación” (Esquivel, 2005).

Los factores de capacidad de carga son obtenidos de la Figura 4.1 del CCCR-2009, que representa linealmente los valores, los que dependen del ángulo de fricción interna del suelo.

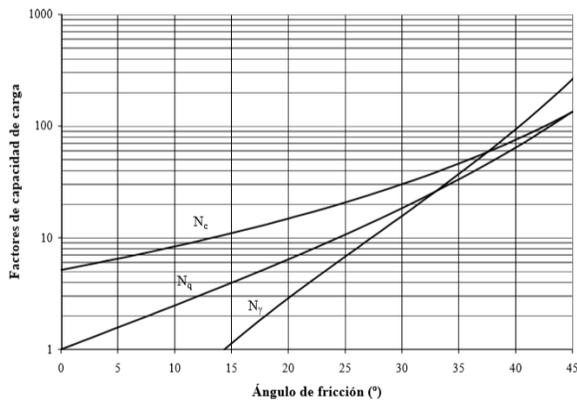


Figura 5. Factores de capacidad de carga para la ecuación general de capacidad de carga. Fuente: (Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009).

El CCCR-2009 en la página 58, indica que, para cimentaciones con cargas excéntricas, se puede realizar una simplificación para determinar los factores modificadores de la capacidad de carga al trabajar con dimensiones reducidas del cimientto (B' , L'). Las dimensiones reducidas del cimientto pueden ser calculadas por:

$$B' = B - 2e_b \quad (\text{ec.2})$$

$$L' = L - 2e_L \quad (\text{ec.3})$$

En donde $e_b \leq B/2$ y $e_L \leq L/2$, y el área efectiva se encuentra definida por $A' = B'L'$. Si $B/6 \leq e_b \leq B/2$ y $L/6 \leq e_L \leq L/2$, entonces se deberá realizar una verificación del cimientto contra el volcamiento según lo indicado la sección 6.3.3 del CCCR-2009.

Existen otros métodos aparte de Terzaghi, tales como: el de Meyerhoff, Hansen y Vesic. Bowles (1996) sugiere en la página 228 para la selección de las ecuaciones tomar en cuenta.

Cuadro 1. Criterios para la selección de ecuaciones	
Ecuación	Mejor para
Terzaghi	Suelos muy cohesivos donde $D_f/B \leq 1$ sobre todo cuando se quiere una estimación rápida de q_u . No debe ser usada para casos en que se presenten zapatas sometidas a momentos o fuerzas horizontales, o para zapatas fundadas en bases inclinadas o en superficie de un talud.
Hansen, Meyerhoff y Vesic	Pueden ser usadas en cualquier situación dependiendo de la familiaridad que tenga el usuario con cualquiera de los métodos.
Hansen y Vesic	Cuando la zapata es fundada en una base inclinada o en la superficie de un Talud; o cuando $D_f/B > 1$.

Fuente: (Bowles, 1996).

Capacidad admisible del suelo

Es el valor de la presión de apoyo para el cuál el riesgo de falla al corte es mínimo. Esta es igual a la capacidad última de carga dividida por un factor de seguridad (FS) adecuado.

$$q_{adm} = \frac{q_u}{FS} \quad (\text{ec.4})$$

El código de cimentaciones de Costa Rica establece “Como regla general deberá aplicarse un factor de seguridad de 3,0 si el terreno es de tipo normal y si sus propiedades se han investigado en forma correcta (según lo indicado en el Capítulo 3)”. Así mismo, dicta que el factor de seguridad no debe ser inferior a 2,0 aunque se conozcan las cargas con un grado de alta precisión y las propiedades del suelo. Lo antes dicho se resume en la figura 6 (cuadro 3.2 del CCCR-2009).

Condición de carga	Factor de Seguridad Tradicional
Estática	3.0
Estática + Dinámica	2.0

Figura 6. Factores de seguridad para capacidad de soporte. Fuente: (Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009).

Coeficiente de balastro

El coeficiente de balastro es un parámetro que se define como el valor obtenido del cociente entre la presión que actúa en un punto (q) y el desplazamiento (δ), es decir,

$$K_s = \frac{q}{\delta} \quad (\text{ec.5})$$

Este parámetro tiene dimensión de peso específico que depende no sólo de las propiedades del terreno, sino que también depende de las dimensiones del área que carga sobre el terreno. Este parámetro es muy usado en el análisis estructural para cimentaciones, generalmente para zapatas continuas, losas de fundación, vigas y diferentes tipos de pilotes. En la siguiente figura se representa lo que es el coeficiente de balastro.

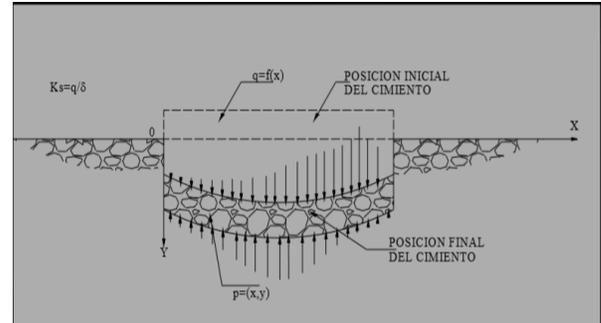


Figura 7. Relación entre la presión y desplazamiento del suelo. Fuente: (Torrice & Tapia, 2009).

Para determinar el coeficiente de balastro existen diferentes investigadores que han desarrollado ecuaciones para llegar a la obtención de este.

Terzaghi propuso un método que hoy se conoce como placa de carga. El ensayo consiste en cargar una placa de forma circular con un diámetro de 30 cm y registrar los asientos presentados en el suelo. A partir de los datos recolectados, Terzaghi propuso dos ecuaciones tanto para suelos cohesivos como para suelos granulares, para de esta manera correlacionar K_{30} con el coeficiente de balastro de la cimentación. Importante el aclarar que los datos presentados en la figura 8 no deben de ser tomados para diseños ya que su fin es meramente para fines descriptivos, para hacer una caracterización general de diferentes tipos de suelos.

$$K = K_{30} \cdot \frac{0,30}{b} \quad \text{Cohesivos} \quad (\text{ec.6})$$

$$K = K_{30} \cdot \left(\frac{b+0,3}{2b}\right)^2 \quad \text{Granulares} \quad (\text{ec.7})$$

Suelo	K_{30} (Kp/cm ²)
Arena seca o húmeda	
—Suelta	0,64-1,92 (1,3)*
—Media	1,92-9,60 (4,0)
—Compacta	9,60-32 (16,0)
Arena sumergida	
—Suelta	(0,8)
—Media	(2,50)
—Compacta	(10,0)
Arcilla	
$q_u = 1-2$ Kp/cm ²	1,6-3,2 (2,5)
$q_u = 2-4$ Kp/cm ²	3,2-6,4 (5,0)
$q_u > 4$ Kp/cm ²	> 6,4 (10)

* Entre paréntesis los valores medios propuestos.

Figura 8. Valores de K_{30} propuestos por Terzaghi. Fuente: (Ortiz, Gesta, & Mazo, 1989).

Existen otras maneras de estimar el coeficiente de balastro. Distintos investigadores han formulado sus ecuaciones para el cálculo del coeficiente de balastro mediante la aplicación del módulo de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson (μ), como la capacidad admisible (q_{adm}).

Vesic propone la siguiente fórmula para encontrar el coeficiente de balastro:

$$K = \frac{E}{b \cdot (1 - \mu^2)} \quad (\text{ec.8})$$

En la Tesis de maestría de Nelson Morrison titulada "Interacción Suelo - estructuras: Semi – espacio Winkler" el autor realiza un resumen de distintos trabajos que han realizados diferentes ingenieros renombrados de distintas épocas, por ejemplo, el Prof. Terzaghi. Y los representa en el cuadro 2 donde presenta diferentes valores del coeficiente de balastro en función de la capacidad admisible (esfuerzo admisible) del terreno en cuestión.

Cuadro 2. Módulos de reacción del suelo					
Esf. Adm. <i>(kg/cm²)</i>	Winkler <i>(kg/cm³)</i>	Esf. Adm. <i>(kg/cm²)</i>	Winkler <i>(kg/cm³)</i>	Esf. Adm. <i>(kg/cm²)</i>	Winkler <i>(kg/cm³)</i>
0,25	0,65	1,55	3,19	2,85	5,70
0,30	0,78	1,60	3,28	2,90	5,80
0,35	0,91	1,65	3,37	2,95	5,90
0,40	1,04	1,70	3,46	3,00	6,00
0,45	1,17	1,75	3,55	3,05	6,10
0,50	1,30	1,80	3,64	3,10	6,20
0,55	1,39	1,85	3,73	3,15	6,30
0,60	1,48	1,90	3,82	3,20	6,40
0,65	1,57	1,95	3,91	3,25	6,50
0,70	1,66	2,00	4,00	3,30	6,60
0,75	1,75	2,05	4,10	3,35	6,70
0,80	1,84	2,10	4,20	3,40	6,80
0,85	1,93	2,15	4,30	3,45	6,90
0,90	2,02	2,20	4,40	3,50	7,00
0,95	2,11	2,25	4,50	3,55	7,10
1,00	2,20	2,30	4,60	3,60	7,20
1,05	2,29	2,35	4,70	3,65	7,30
1,10	2,38	2,40	4,80	3,70	7,40
1,15	2,47	2,45	4,90	3,75	7,50
1,20	2,56	2,50	5,00	3,80	7,60
1,25	2,65	2,55	5,10	3,85	7,70
1,30	2,74	2,60	5,20	3,90	7,80
1,35	2,83	2,65	5,30	3,95	7,90
1,40	2,92	2,70	5,40	4,00	8,00
1,45	3,01	2,75	5,50		
1,50	3,10	2,80	5,60		

Fuente: (Morrison, 1993).

El coeficiente de balastro en el análisis estructural de cimentaciones es de gran importancia en el momento de concluir si una cimentación exhibirá un comportamiento rígido o flexible cuando sea colocada sobre un suelo determinado. Para poder realizar una diferenciación entre uno de los dos comportamientos antes mencionados, el CCCR (2009), propone la siguiente ecuación, que si cumple con la relación se asume que el comportamiento que presentará el cimiento es rígido:

$$L < \frac{1}{4} \frac{\pi}{\sqrt{\frac{K_s B}{4 E_c I}}} \quad (\text{ec.9})$$

Donde:

L = Dimensión máxima del cimiento.

B = Ancho del cimiento.

E_c = Módulo de elasticidad del concreto.

I = Momento de inercia de la sección transversal del cimiento.

K_s = Módulo de reacción vertical del suelo o coeficiente de balastro.

Estabilidad contra el volcamiento

Cuando la cimentación se encuentra bajo la acción de solo compresión no es necesario verificar esta condición, ya que no hay probabilidad de volcamiento, pero en caso contrario cuando $e_b > B/6$ o $e_L > L/6$ debe de revisarse la seguridad contra el volcamiento según lo indica la sección 6.3.3 del CCCR-2009.

La revisión de esta condición se lleva a cabo mediante un análisis de las fuerzas que brindan estabilidad a la estructura y las fuerza que provocan el volcamiento de esta, a través de una sumatoria de momentos en un extremo de la cimentación. En donde el producto de los momentos generados por las fuerzas estabilizadoras debe de ser mayor al producto de las fuerzas que producen el volcamiento.

Esta relación de momentos se expresa como un factor de seguridad contra el volcamiento (FS_v). “Donde FS_v deberá ser mayor o igual a 1,5 para suelo granulares y en caso de suelos cohesivo el profesional deberá de ser cuidadoso ante la incertidumbre que se introduce al estimar la resistencia al corte” (Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009). La ecuación 10 representa lo antes mencionado:

$$FS_v = \frac{M_{est}}{M_{vol}} \quad (\text{ec.10})$$

Donde:

M_{est} = Sumatoria de los momentos de las fuerzas estabilizadoras.

M_{vol} = Sumatoria de los momentos de las fuerzas de volcamiento.

Metodologías de Análisis para cimentaciones

A continuación, se presentan algunos de los métodos para el diseño de cimentaciones que van desde los métodos convencionales a los más modernos como son los de Interacción suelo-estructura (ISE).

Método rígido convencional

En el *método rígido convencional*, “la cimentación se supone que es infinitamente rígida. Además, la presión en el suelo está distribuida en una línea recta y el centroide de la presión en el suelo coincide con la línea de acción de las cargas resultantes” (Das, 2012). En la siguiente representación gráfica se aprecia lo antes mencionado:

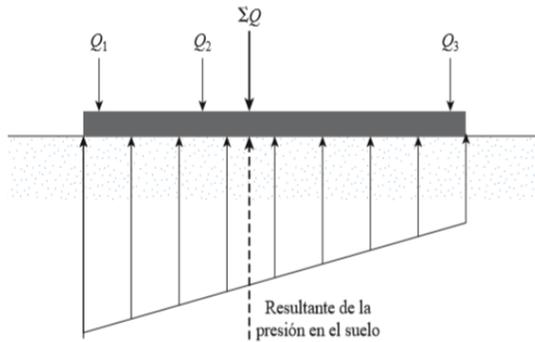


Figura 9. Principios de diseño rígido. Fuente: (Das, 2012).

Interacción suelo – estructura (ISE)

La *interacción suelo – estructura* “es aquella parte de la ingeniería que estudia las deformaciones del terreno de cimentación cuando éstas se ven afectadas por la presencia y rigidez de la propia estructura. La influencia de la estructura puede ser en condiciones estáticas, lo cual es tratado por la interacción estática suelo-estructura, o puede ser en condiciones dinámicas, lo cual cae en el campo de la interacción dinámica suelo-estructura” (Colina, s.f.). Para llevar a cabo este tipo de análisis generalmente se implementa el uso de elementos finitos (MEF) ya que permite representar el suelo como un medio elástico a través de resortes lineales.

La ISE plantea en tomar las características del suelo, es decir, que el suelo no es infinitamente rígido como suele asumirse en la mayoría de los análisis estructurales, sino que posee un cierto porcentaje de amortiguación que absorbe parte de la energía producida por el sismo.

Modelos de Interacción Suelo-Estructura

Existen variedad de modelos dinámicos aceptados, que mediante la utilización de coeficientes de rigideces tanto traslacionales como rotacionales, representarían como es que realmente interactúa el suelo con la estructura. A continuación, se presentan los modelos de ISE que se utilizarán para este proyecto:

Método Winkler

El *método Winkler* “parte de la hipótesis de que el asiento producido en un punto es proporcional a la presión a la que está sometido, transmitida por la cimentación. Analíticamente, $p=ks \cdot y$, donde p representa la presión transmitida al terreno, y –ó s– el asiento experimentado y ks el factor de proporción entre ambos, conocido con el nombre de *Módulo de Reacción*, *Coficiente de Reacción*, *Coficiente de Reacción de la Subrasante*, *Coficiente o Módulo de Balastro*” (Tellado, 1999), el cual tiende a representarse con las unidades de kg/cm^3 . Esta constante ks es representada en un modelo a través de una cama de resortes que actúan independientemente (ver figura 10).

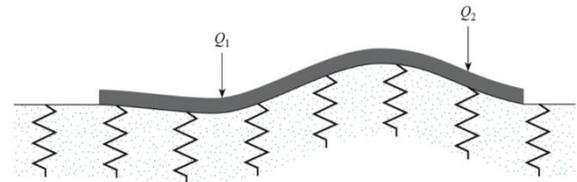


Figura 10. Principios del método de Winkler. Fuente: (Das, 2012).

Sin embargo, existen algunas objeciones al modelo que lo hacen ser poco fiable según (Meza Rodríguez & Valderrama Carpio, 2014):

- La precisión del modelo dependerá de la rigidez relativa del conjunto estructura-cimentación respecto a la del suelo.
- El valor del módulo de balasto no es función exclusiva del terreno, sino que depende también de las características geométricas de la cimentación e incluso de la estructura que ésta sostiene, lo cual hace compleja la extrapolación de los resultados de los ensayos, pensemos por ejemplo, en el de placa de carga, a las cimentaciones reales.
- Supone que cada punto del suelo se comporta independientemente de las cargas existentes en sus alrededores, lo cual no ocurre en la realidad.

Funciones de impedancia

Las funciones de impedancia representan las características de rigidez y amortiguación dependientes de la frecuencia de la interacción suelo-cimentación. Las soluciones clásicas para la función de impedancia valorada compleja se pueden escribir como (Luco & Westmann, 1971); (Veletsos & Wei, 1971):

$$\bar{k}_j = k_j + i\omega c_j \quad (\text{ec.11})$$

Donde \bar{k}_j denota la función de impedancia de valor complejo; j es un índice que indica modos de desplazamiento o rotación de traslación; k_j y c_j denotan la rigidez de la base dependiente de la frecuencia y los coeficientes del amortiguador, respectivamente, para el modo j ; y ω es la frecuencia circular (rad / s). Una dashpot con coeficiente c_j representa los efectos del amortiguamiento asociados con la interacción suelo-cimiento. Una forma alternativa de la ecuación 11 es:

$$\bar{k}_j = k_j(1 + 2i\beta_j) \quad (\text{ec.12})$$

Donde:

$$\beta_j = \frac{\omega c_j}{2k_j} \quad (\text{definida por } k_j > 0) \quad (\text{ec.13})$$

Donde β_j al estar en términos de c_j en la resonancia del sistema de ISE, β_j , se puede interpretar como una fracción del amortiguamiento crítico en el sentido clásico. Cabe recalcar que para este proyecto todo lo calculado se hace para un amortiguamiento del 5%.

Existen muchas soluciones de función de impedancia disponibles para cimentaciones rígidas circulares o rectangulares ubicadas en la superficie de, o incrustadas dentro de un semi espacio uniforme, elástico o viscoelástico. En el caso de una cimentación rectangular rígida que descansa sobre la superficie de un medio espacio con velocidad de onda de corte V_s , (Pais & Kausel, 1988), (Gazetas, 1991) y (Mylonakis, Nikolaoub, & Gazetas, 2006) revisan las soluciones de impedancia en la literatura y presentan ecuaciones para calcular los términos de rigidez y amortiguación en la ecuación 12.

Las soluciones describen la rigidez de traslación y el amortiguamiento a lo largo de los ejes x , y , y z , y la rigidez de rotación y el amortiguamiento alrededor de esos ejes

(indicados xx , yy y zz). La rigidez dinámica se denota k_j , y es una función de las dimensiones de la cimentación, el módulo de corte del suelo, G , la relación de Poisson del suelo, ν , los modificadores de rigidez dinámica, α_j , y los modificadores de empotramiento, η_j :

$$k_j = K_j \times \alpha_j \times \eta_j \quad (\text{ec.14})$$

Donde:

K_j = Es la rigidez de la cimentación estática.

α_j = Los modificadores de rigidez dinámica.

η_j = Los modificadores de empotramiento.

La figura 11 enumera las expresiones para la rigidez de la cimentación estática, K_j , para tres grados de libertad de traslación y tres de rotación para una cimentación rectangular rígida ubicada en la superficie del suelo. Estas ecuaciones son similares para (Pais & Kausel, 1988), (Gazetas, 1991) y (Mylonakis, Nikolaoub, & Gazetas, 2006).

La incrustación de cimientos debajo de la superficie del suelo aumenta la rigidez estática de los cimientos. Los factores, η_j , para aumentar K_j por los efectos del empotramiento se proporcionan en la figura 12. Las ecuaciones de (Pais & Kausel, 1988) se utilizan con mayor frecuencia en la práctica. Las ecuaciones de (Gazetas, 1991) y (Mylonakis, Nikolaoub, & Gazetas, 2006) son más generales y dan cuenta de los efectos de empotramiento que resultan del espacio entre el suelo y las paredes laterales de los cimientos.

Las ecuaciones para los modificadores de rigidez dinámica, α_j , y las relaciones de amortiguamiento de radiación, β_j , para zapatas rígidas ubicadas en la superficie del suelo se proporcionan en la figura 13. Los modificadores de rigidez dinámica (son los mismo que los de superficie) y las relaciones de amortiguación de radiación para zapatas empotradas se proporcionan en la figura 14. Las funciones de impedancia por utilizar se encierran en rojo y son seleccionadas debido a que solo se aplican fuerzas axiales y de momentos a las cimentaciones y no fuerzas cortantes.

Por tanto, se seleccionan K_z para las fuerzas axiales (verticales) y K_{xx} y K_{yy} para los momentos (rotacionales) y estas son:

Elastic Solutions for Static Stiffness of Rigid Footings at the Ground Surface

Degree of Freedom	Pais and Kausel (1988)	Gazetas (1991); Mylonakis et al. (2006)
Translation along z-axis	$K_{z, sur} = \frac{GB}{1-\nu} \left[3.1 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.75} + 1.6 \right]$	$K_{z, sur} = \frac{2GL}{1-\nu} \left[0.73 + 1.54 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.75} \right]$
Translation along y-axis	$K_{y, sur} = \frac{GB}{2-\nu} \left[6.8 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 0.8 \left(\frac{L}{B} \right) + 1.6 \right]$	$K_{y, sur} = \frac{2GL}{2-\nu} \left[2 + 2.5 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.85} \right]$
Translation along x-axis	$K_{x, sur} = \frac{GB}{2-\nu} \left[6.8 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 2.4 \right]$	$K_{x, sur} = K_{y, sur} - \frac{0.2}{0.75-\nu} GL \left(1 - \frac{B}{L} \right)$
Torsion about z-axis	$K_{zz, sur} = GB^3 \left[4.25 \left(\frac{L}{B} \right)^{2.45} + 4.06 \right]$	$K_{zz, sur} = GJ_t^{0.75} \left[4 + 11 \left(1 - \frac{B}{L} \right)^{10} \right]$
Rocking about y-axis	$K_{yy, sur} = \frac{GB^3}{1-\nu} \left[3.73 \left(\frac{L}{B} \right)^{2.4} + 0.27 \right]$	$K_{yy, sur} = \frac{G}{1-\nu} (I_y)^{0.75} \left[3 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.15} \right]$
Rocking about x-axis	$K_{xx, sur} = \frac{GB^3}{1-\nu} \left[3.2 \left(\frac{L}{B} \right) + 0.8 \right]$	$K_{xx, sur} = \frac{G}{1-\nu} (I_x)^{0.75} \left(\frac{L}{B} \right)^{0.25} \left[2.4 + 0.5 \left(\frac{B}{L} \right) \right]$
Notes:	<p>Axes should be oriented such that $L \geq B$.</p> <p>I_i = area moment of inertia of soil-foundation contact, i denotes which axis to take the surface around.</p> <p>$J_t = I_x + I_y$ polar moment of inertia of soil-foundation contact surface.</p> <p>G = shear modulus (reduced for large strain effects, e.g., Table 2-1).</p>	

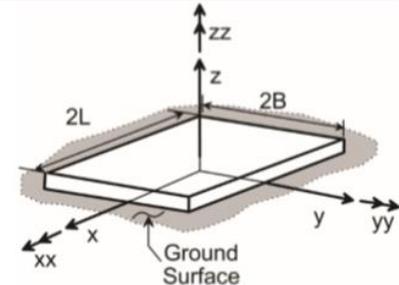


Figura 11. Soluciones elásticas para la rigidez estática de zapatas rígidas en la superficie del suelo. Fuente: (National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP), 2012).

Embedment Correction Factors for Static Stiffness of Rigid Footings

Degree of Freedom	Pais and Kausel (1988)	Gazetas (1991); Mylonakis et al. (2006)
Translation along z-axis	$\eta_z = \left[1.0 + \left(0.25 + \frac{0.25}{L/B} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^{0.8} \right]$	$\eta_z = \left[1 + \frac{D}{21B} \left(1 + 1.3 \frac{B}{L} \right) \right] \left[1 + 0.2 \left(\frac{A_w}{4BL} \right)^{2/3} \right]$
Translation along y-axis	$\eta_y = \left[1.0 + \left(0.33 + \frac{1.34}{1+L/B} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^{0.8} \right]$	$\eta_y = \left(1 + 0.15 \sqrt{\frac{D}{B}} \right) \left[1 + 0.52 \left(\frac{z_w A_w}{BL^2} \right)^{0.4} \right]$
Translation along x-axis	$\eta_x \approx \eta_y$	Same equation as for η_y , but A_w term changes for $B \neq L$
Torsion about z-axis	$\eta_{zz} = \left[1 + \left(1.3 + \frac{1.32}{L/B} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^{0.9} \right]$	$\eta_{zz} = 1 + 1.4 \left(1 + \frac{B}{L} \right) \left(\frac{d_w}{B} \right)^{0.9}$
Rocking about y-axis	$\eta_{yy} = \left[1.0 + \frac{D}{B} + \left(\frac{1.6}{0.35 + (L/B)^4} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^2 \right]$	$\eta_{yy} = 1 + 0.92 \left(\frac{d_w}{B} \right)^{0.6} \left[1.5 + \left(\frac{d_w}{D} \right)^{1.9} \left(\frac{B}{L} \right)^{-0.6} \right]$
Rocking about x-axis	$\eta_{xx} = \left[1.0 + \frac{D}{B} + \left(\frac{1.6}{0.35 + L/B} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^2 \right]$	$\eta_{xx} = 1 + 1.26 \frac{d_w}{B} \left[1 + \frac{d_w}{B} \left(\frac{d_w}{D} \right)^{-0.2} \sqrt{\frac{B}{L}} \right]$

Notes:

d_w = height of effective side wall contact (may be less than total foundation height)

z_w = depth to centroid of effective sidewall contact

A_w = sidewall-solid contact area, for constant effective contact height, d_w , along perimeter.

For each degree of freedom, calculate $K_{emb} = \eta K_{sur}$

Coupling Terms: $K_{emb,rx} = \left(\frac{D}{3} \right) K_{emb,x}$

$$K_{emb,ry} = \left(\frac{D}{3} \right) K_{emb,y}$$

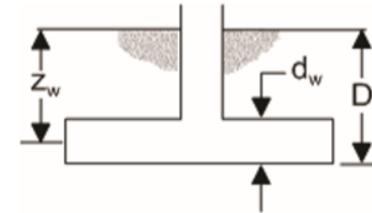


Figura 12. Factores de corrección de empotramiento para la rigidez estática de zapatas rígidas. Fuente: (National Earthquake Hazards Reduction Program(NEHRP), 2012).

Dynamic Stiffness Modifiers and Radiation Damping Ratios for Rigid Footings (adapted from Pais and Kausel, 1988)

Degree of Freedom	Surface Stiffness Modifiers	Radiation Damping
Translation along z-axis	$\alpha_z = 1.0 - \frac{\left(0.4 + \frac{0.2}{L/B}\right) a_0^2}{\left(\frac{10}{1+3(L/B-1)}\right) + a_0^2}$	$\beta_z = \left[\frac{4\psi(L/B)}{(K_{z,sur}/GB)}\right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_z}\right]$
Translation along y-axis	$\alpha_y = 1.0$	$\beta_y = \left[\frac{4(L/B)}{(K_{y,sur}/GB)}\right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_y}\right]$
Translation along x-axis	$\alpha_x = 1.0$	$\beta_x = \left[\frac{4(L/B)}{(K_{x,sur}/GB)}\right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_x}\right]$
Torsion about z-axis	$\alpha_{zz} = 1.0 - \frac{\left(0.33 - 0.03\sqrt{L/B-1}\right) a_0^2}{\left(\frac{0.8}{1+0.33(L/B-1)}\right) + a_0^2}$	$\beta_{zz} = \left[\frac{(4/3)\left[(L/B)^3 + (L/B)\right] a_0^2}{(K_{zz,sur}/GB^3) \left[\left(\frac{1.4}{1+3(L/B-1)}\right)^{0.7} + a_0^2\right]}\right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{zz}}\right]$
Rocking about y-axis	$\alpha_{yy} = 1.0 - \frac{0.55 a_0^2}{\left(0.6 + \frac{1.4}{(L/B)^3}\right) + a_0^2}$	$\beta_{yy} = \left[\frac{(4\psi/3)(L/B)^3 a_0^2}{\left(\frac{K_{yy,sur}}{GB^3}\right) \left[\left(\frac{1.8}{1+1.75(L/B-1)}\right) + a_0^2\right]}\right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{yy}}\right]$
Rocking about x-axis	$\alpha_{xx} = 1.0 - \frac{\left(0.55 + 0.01\sqrt{L/B-1}\right) a_0^2}{\left(2.4 - \frac{0.4}{(L/B)^3}\right) + a_0^2}$	$\beta_{xx} = \left[\frac{(4\psi/3)(L/B) a_0^2}{(K_{xx,sur}/GB^3) \left[\left(2.2 - \frac{0.4}{(L/B)^3}\right) + a_0^2\right]}\right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{xx}}\right]$
Notes:	<p>Orient axes such that $L \geq B$.</p> <p>Soil hysteretic damping, β_s, is additive to foundation radiation damping, β.</p> <p>$a_0 = \omega B / V_s$; $\psi = \sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)}$; $\psi \leq 2.5$</p>	

Figura 13. Modificadores de rigidez dinámica y relaciones de amortiguación de radiación para zapatas rígidas. Fuente: (National Earthquake Hazards Reduction Program(NEHRP), 2012).

Dynamic Stiffness Modifiers and Radiation Damping Ratios for Embedded Footings (adapted from Pais and Kausel, 1988)

Degree of Freedom	Radiation Damping
Translation along z-axis	$\beta_z = \left[\frac{4[\psi(L/B) + (D/B)(1+L/B)]}{(K_{z,emb}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_z} \right]$
Translation along y-axis	$\beta_y = \left[\frac{4[L/B + (D/B)(1+\psi L/B)]}{(K_{y,emb}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_y} \right]$
Translation along x-axis	$\beta_x = \left[\frac{4[L/B + (D/B)(\psi + L/B)]}{(K_{x,emb}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_x} \right]$
Torsion about z-axis	$\beta_{zz} = \left[\frac{(4/3) \left[3(L/B)(D/B) + \psi(L/B)^3(D/B) + 3(L/B)^2(D/B) + \psi(D/B) + (L/B)^3 + (L/B) \right] a_0^2}{\left(\frac{K_{zz,emb}}{GB^3} \right) \left[\left(\frac{1.4}{1+3(L/B-1)^{0.7}} \right) + a_0^2 \right]} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{zz}} \right]$
Rocking about y-axis	$\beta_{yy} = \left[\frac{(4/3) \left[\left(\frac{L}{B} \right)^3 \left(\frac{D}{B} \right) + \psi \left(\frac{D}{B} \right)^3 \left(\frac{L}{B} \right) + \left(\frac{D}{B} \right)^3 + 3 \left(\frac{D}{B} \right) \left(\frac{L}{B} \right)^2 + \psi \left(\frac{L}{B} \right)^3 \right] a_0^2 + \left(\frac{4}{3} \right) \left(\frac{L}{B} + \psi \right) \left(\frac{D}{B} \right)^3}{\left(\frac{K_{yy,emb}}{GB^3} \right) \left[\left(\frac{1.8}{1+1.75(L/B-1)} \right) + a_0^2 \right]} + \left(\frac{K_{yy,emb}}{GB^3} \right)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{yy}} \right]$
Rocking about x-axis	$\beta_{xx} = \left[\frac{(4/3) \left[\left(\frac{D}{B} \right) + \left(\frac{D}{B} \right)^3 + \psi \left(\frac{L}{B} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^3 + 3 \left(\frac{D}{B} \right) \left(\frac{L}{B} \right) + \psi \left(\frac{L}{B} \right) \right] a_0^2 + \left(\frac{4}{3} \right) \left(\psi \frac{L}{B} + 1 \right) \left(\frac{D}{B} \right)^3}{\left(\frac{K_{xx,emb}}{GB^3} \right) \left[\left(\frac{1.8}{1+1.75(L/B-1)} \right) + a_0^2 \right]} + \left(\frac{K_{xx,emb}}{GB^3} \right)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{xx}} \right]$
Notes:	Soil hysteretic damping, β_s , is additive to foundation radiation damping, β $\alpha_{emb} = \alpha_{sur}$; from Table 2-3a $a_0 = \omega B / V_s$; $\psi = \sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)}$; $\psi \leq 2.5$

Figura 14. Modificadores dinámicos de rigidez y relaciones de amortiguación de radiación para zapatas empotradas. Fuente: (National Earthquake Hazards Reduction Program(NEHRP), 2012).

Método de elementos finito (MEF)

El *método de elementos finitos* “es un método de aproximación de problemas continuos, de tal forma que” (Valero, 2004):

- El continuo se divide en un número de finito de partes, “**elementos**”, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados “**nodos**”. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.
- La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación o funciones de forma.

Por tanto, el MEF se enfoca en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que pasa en el interior de este modelo o cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir de conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

Factores de carga

Para la parte del diseño, el CSCR-10 dicta que las cargas que se presentan en la estructura deben ser factorizadas por coeficientes que amplifican o en ocasiones reducen los valores de las cargas, y al combinarse estas, se crea un valor de carga última. La implementación de los coeficientes es debido a la probabilidad de que se presenten variaciones en las propiedades de los materiales usados para la

construcción, los defectos constructivos y otros posibles aspectos. Mientras que la combinación de las cargas se da para considerar las posibles acciones de los diferentes tipos de cargas que se dan en un momento dado en la estructura.

El Código Sísmico de Costa Rica 2010 (CSCR-10), en sección 6.2.1 define cuatro combinaciones de carga para estimar las posibles cargas últimas que pueden actuar sobre la estructura. Estas combinaciones (solicitaciones últimas) se presentan a continuación:

$$CU = 1,4 CP \quad (\text{ec.15})$$

$$CU = 1,2CP + 1,6 + 1,6CE \quad (\text{ec.16})$$

$$CU = 1,05CP + f_1 CT \pm CS + CE \quad (\text{ec.17})$$

$$CU = 0,95CP \pm CS + CE \quad (\text{ec.18})$$

Donde:

CU = Carga última de diseño.

CP = Carga permanente.

CT = Carga temporal, sin la reducción indicada en el artículo 6.3.

CS = Carga sísmica.

CE = Carga por empuje.

f_1 = 0.5 para edificaciones de baja probabilidad de ocupación plena de carga temporal a la hora de sismo, 1.0 para el caso opuesto y 0.0 para techos.

f_R = Factor de reducción de carga temporal según el artículo 6.3.

A las solicitaciones últimas de CSCR-10 se le suman los estados de servicio estático (ecuación 19) y dinámicos (ecuación 20 y 21), las cuales son:

$$CP + CT \quad (\text{ec.19})$$

$$1,1CP + 0,5CT + CS_x \quad (\text{ec.20})$$

$$1,1CP + 0,5CT + CS_y \quad (\text{ec.21})$$

A su vez, a las ecuaciones 17 y 18 (con una modificación) se les determinan sus componentes de la resultante sísmica, con lo cual se obtiene las siguientes combinaciones (solicitaciones últimas dinámicas):

$$1,05CP + 0,5CT \pm 1CS_x \pm 0,3CS_y \quad (\text{ec.22})$$

$$0,95CP + 0,5CT \pm CS_x \pm 0,3CS_y \quad (\text{ec.23})$$

Lo que resulta en un total de 21 combinaciones al contar las 16 obtenidas por componentes sísmica (solicitaciones últimas

dinámicas), las 3 de estados servicio y la ecuación 15 y 16 (solicitaciones últimas estáticas). Estas combinaciones de carga serán introducidas a los modelos en SAP 2000 de los edificios para obtener las reacciones en las bases de las columnas.

Diseño de la cimentación

El diseño estructural está basado en el libro de Diseño de Concreto Reforzado de Jack. Mc Cormac 10° edición el cual se basa en los parámetros de diseño del ACI 318-14 (similar a la versión 2019), CCCR-2009 y el CSCR-10.

Espesor de la zapata

Basado en el código ACI 318-19 sugiere en la sección 13.3.1.2 que la altura mínima sobre el refuerzo inferior a flexión es de 15 cm, teniendo en cuenta que la tabla 20.5.1.3.2 recomienda un recubrimiento de 7,5 cm para elementos de concreto que estén en contacto con el suelo. Y considerando varillas #6 (Ø 19mm) se obtiene un espesor de zapata de mínimo (h) cercano a los 25 cm.

Área de la cimentación

El diseño de una losa requiere la definición de un área adecuada para distribuir adecuadamente los esfuerzos que bajan de la estructura al suelo, el área se determina igualando la capacidad o esfuerzo admisible del suelo q_a con el esfuerzo actuante resultante de las cargas obtenidas con las ecuaciones 19, 20 y 21 sobre la estructura, como lo expresa la siguiente ecuación:

$$q_{adm} \geq q_{act} \quad (ec.24)$$

La carga actuante q_{act} es definida en el Código de Cimentaciones de Costa Rica (CCCR-2009) en la sección 4.2.3 por la ecuación 4.6, la cual supone una distribución trapezoidal (en forma de sobrepresión ver figura 16 (b)) de los esfuerzos al suelo siempre y cuando la excentricidad sea menor a 1/6 del ancho(B) y largo(L) de la cimentación. La ecuación se muestra a continuación:

$$q_{act} = \frac{P}{A_{req}} \cdot \left(1 \pm \frac{6e_b}{B} \pm \frac{6e_L}{L} \right) \quad (ec.25)$$

Donde:

q_{act} = Carga actuante del suelo (kg/m²).

P = Carga vertical(kg).

A_{req} = Área requerida para la placa (m²).

e_b = Excentricidad en el sentido de la dimensión menor (m).

e_L = Excentricidad en el sentido de la dimensión mayor (m).

B = Ancho mínimo de la placa eje y (m).

L = Lado mayor de la placa eje x (m).

De lo contrario si la excentricidad está entre $B/6 \leq e_b \leq B/2$ y $L/6 \leq e_L \leq L/2$ se debe tomar la ecuación 4.7 del mismo código, que supone una distribución en forma triangular (en forma de sobrepresión ver figura 16 (c y d)) de los esfuerzos al suelo, como se presenta a continuación:

$$q_{act} = K \left(\frac{P}{BL} \right) \quad (ec.26)$$

Donde K es una constante que se obtiene de la figura 4.2 del CCCR-2009 (ver figura 15).

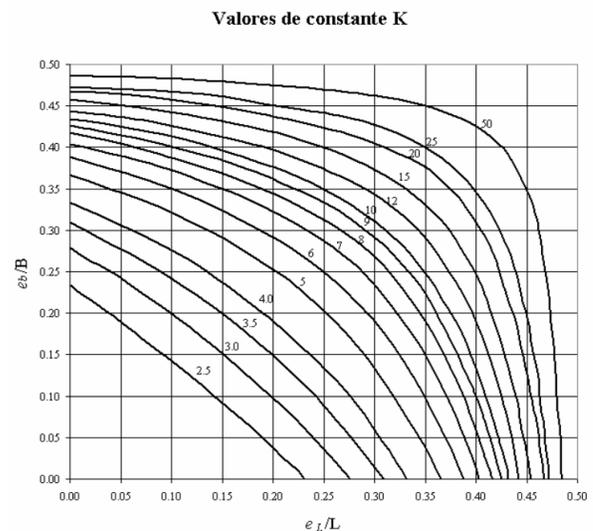


Figura 15 . Valores de la constante K. Fuente: (Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009)

Cabe recalcar que aparte de las cargas que actúan sobre la placa, es importante el considerar el peso de esta para cumplir con la ecuación 24. Importante mencionar que las dimensiones de B y

L obtenidas inicialmente son un punto de partida y que a través de iteraciones se obtienen las dimensiones que satisfagan la ecuación 25. A continuación, se presentan las distintas sobrepresiones que se presentan en la placa debido a la variación en la aplicación de las cargas.

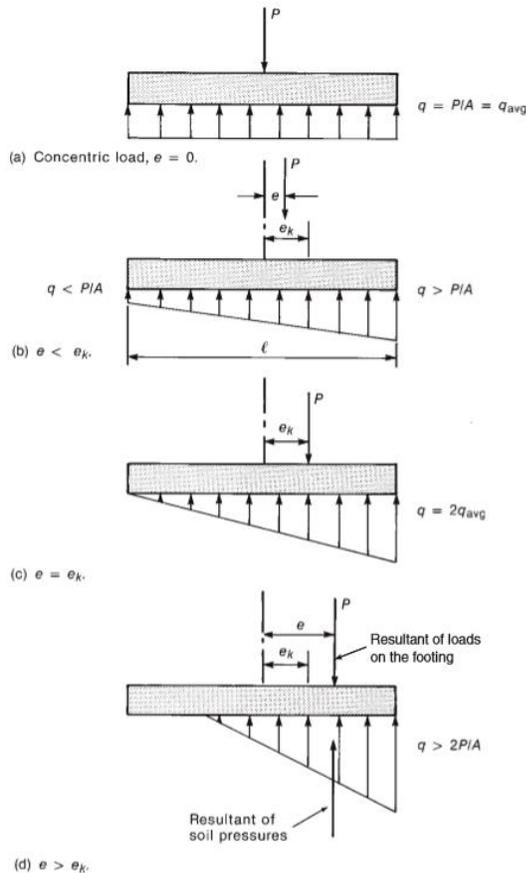


Figura 16 . Presiones del suelo según excentricidad de la carga. Fuente: (Wight & MacGregor, 2012).

La figura 16 (a), representa la aplicación de una carga concéntrica en la zapata, lo cual hace que la distribución de la presión en el suelo sea uniforme en toda el área en que la cimentación está en contacto con el suelo. Caso contrario para las cimentaciones que están cargada excéntrica, la distribución no es uniforme como lo muestra la figura 16 (b, c y d).

Para el alcance de este trabajo se tomarán $e > 0$, es decir, una distribución no uniforme de la presión del suelo en el área de contacto.

Cortante por punzonamiento

Regalado Tesoro (como se citó en (Menargue)) define el punzonamiento de la siguiente manera “es cuando se produce una rotura de esta (zapata) alrededor del pilar (columna) en que apoya, de forma tronco-piramidal o tronco - cónica, según el pilar sea rectangular u circular. La superficie de rotura arranca sensiblemente del perímetro donde la losa apoya, y se eleva con una inclinación comprendida entre 30° y 45° , recibiendo el nombre de “superficie crítica de punzonamiento”. En la siguiente figura se representa el fenómeno antes mencionado:

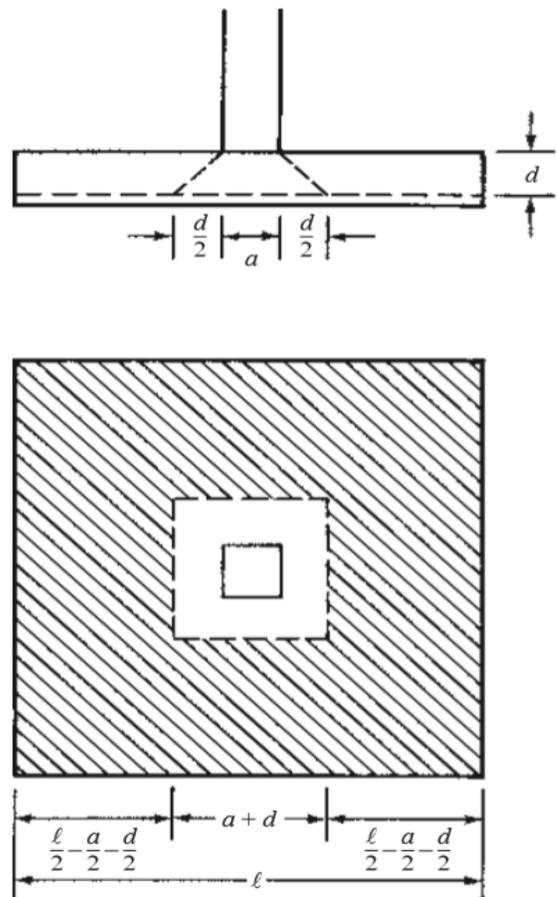


Figura 17. Cortante por punzonamiento. Fuente: (Cormac & Brown, 2018).

Por tanto, en la sección 22.6.4 del ACI 318-19 establece que la sección crítica para cortante en dos sentidos se localiza a una distancia $d/2$ de la cara de la columna. El esfuerzo cortante para el

cortante en dos sentidos se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_u = [A - b_o] \cdot q_u \quad (\text{ec.27})$$

La resistencia nominal al cortante en dos sentidos V_c del concreto, se determina como el menor de los valores obtenidos a partir de las 3 siguientes ecuaciones que se encuentran en la sección 22.6.5.2 del ACI 318-19.

$$V_c = 1,1\lambda\sqrt{f'_c}b_o d \quad (\text{ec.27})$$

$$V_c = 0,53 \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \cdot \lambda\sqrt{f'_c}b_o d \quad (\text{ec.28})$$

$$V_c = 0,27 \cdot \left(2 + \frac{\alpha_s d}{b_o}\right) \cdot \lambda\sqrt{f'_c}b_o d \quad (\text{ec.29})$$

El valor de d requerido para el cortante en dos sentidos es el mayor que se obtiene de las siguientes expresiones:

$$d = \frac{V_{u2}}{\phi 1,1\lambda\sqrt{f'_c}b_o} \quad (\text{ec.30})$$

$$d = \frac{V_{u2}}{\phi 0,53 \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \cdot \lambda\sqrt{f'_c}b_o} \quad (\text{ec.31})$$

$$d = \frac{V_{u2}}{\phi 0,27 \cdot \left(2 + \frac{\alpha_s d}{b_o}\right) \cdot \lambda\sqrt{f'_c}b_o} \quad (\text{ec.32})$$

En donde:

β : $\frac{\text{lado corto de la columna}}{\text{lado largo de la columna}}$

$b_o = 2(a + d) + 2(b + d)$.

$\alpha = 40$ (para columna interior).

$\alpha = 30$ (para columna de borde).

$\alpha = 20$ (para columna esquinera).

$\lambda = 1$ en concreto normal.

$\phi = 0,75$

Cortante en un sentido

El cortante en un sentido o cortante de viga es la sección crítica que se ubica a una distancia d de la cara de la columna. Según el libro de "Diseño de Concreto Reforzado" de Mc Cormac, la fuerza cortante total (V_u) que se toma a lo largo de la sección 1-1 representado en la figura 18. Es igual a la presión neta del suelo q_u multiplicado por el área

sombreada hacia afuera de la misma sección. El valor máximo de V_c si no se usan estribos es de:

$$V_c = \phi 0,53\lambda\sqrt{f'_c}b_w d \quad (\text{ec.33})$$

Donde:

$$\phi = 0.75$$

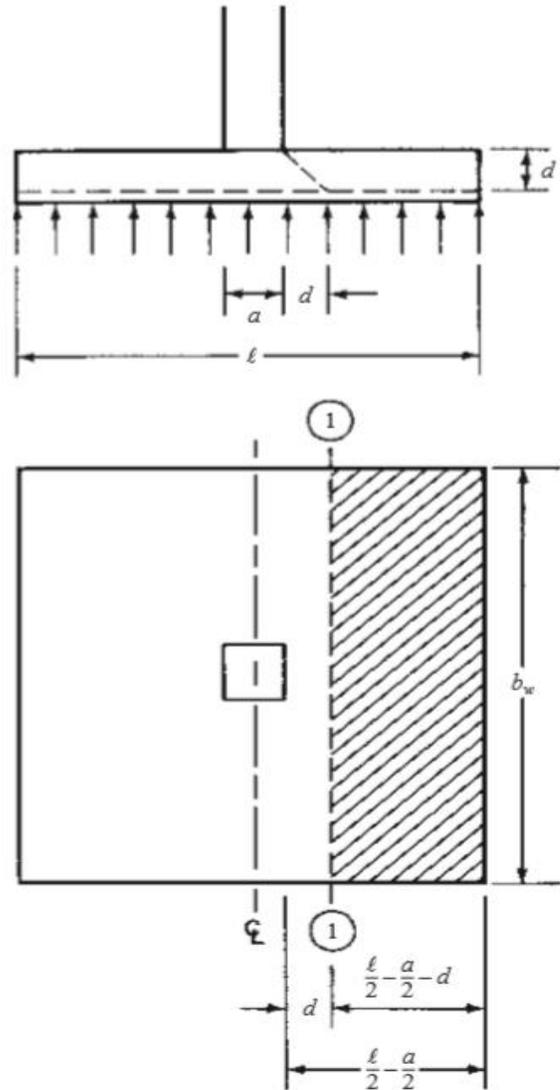


Figura 18. Cortante en un sentido o de viga. Fuente: (Cormac & Brown, 2018).

En la sección 22.5.8 del ACI 318-19 la revisión por cortante en un sentido debe cumplir que:

$$V_u \leq V_c \quad (\text{ec.34})$$

Donde:

$$V_u = q_u \cdot \left(\frac{L}{2} - \frac{a}{2} - d \right) \cdot b_w \quad (\text{ec.35})$$

Siendo V_u es la fuerza última a corte.

Revisión de cortante CSCR-10

El cortante por punzonamiento y el cortante en una dirección antes mencionados son maneras de revisar la capacidad al corte por la metodología del ACI 318-19, sin embargo, la revisión por cortante utilizada para este proyecto es la del CSCR-10. Siendo más preciso, la ecuación usada para verificar la capacidad cortante de muros estructurales en la sección 8.7.2 del CSCR-10 pero adaptada para cimentaciones. Donde el cortante V_n se determina con la siguiente fórmula:

$$V_n = A_{cv} (\alpha_c \sqrt{f'_c} + \rho_n f_y) \quad (\text{ec.36})$$

Donde:

$\alpha_c = 0,80$ para $L/t \leq 1,5$ y $0,53$ para $L/t \geq 1,5$.

$L =$ lado largo de la cimentación (cm).

$t =$ espesor de la cimentación.

$A_{cv} =$ área neta de la sección de concreto que resiste cortante.

$f'_c =$ resistencia en compresión del concreto, en kg/cm^2 .

$f_y =$ esfuerzo de cedencia del acero paralelo al área A_{cv} , en kg/cm^2 .

$\rho_n =$ razón del área de refuerzo distribuido paralelo al plano A_{cv} , respecto al área bruta de concreto perpendicular a dicho refuerzo.

Con ρ_n igual a:

$$\rho_n = \# \text{mallas} \left(\frac{A_v}{\text{dist} \cdot \text{Sep}} \right) \quad (\text{ec.37})$$

Donde:

$\# \text{mallas} =$ es el número de mallas por usar que puede ser 1 ó 2.

$A_v =$ área de 1 varilla (la selecciona en flexión para el refuerzo).

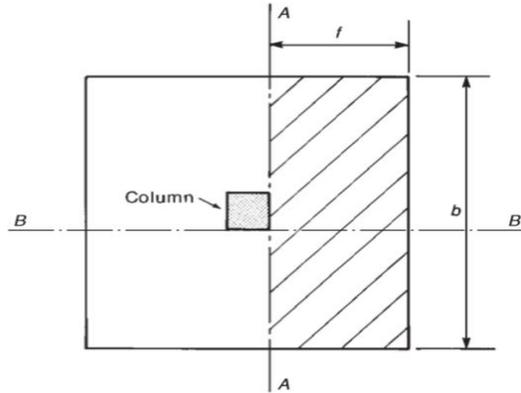
$\text{dist} =$ distanciamiento horizontal entre varillas de la malla inferior.

$\text{Sep} =$ Separación vertical de malla. Si es 1 malla la separación es igual a $t/2$ y de ser 2 mallas la separación es $(t - 2 \cdot \text{recubrimiento})$.

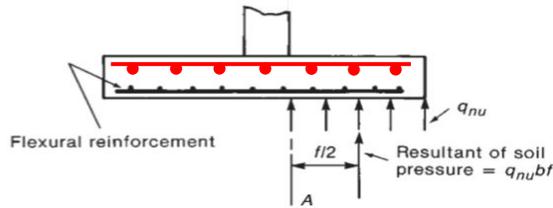
Por último, se tiene que cumplir la condición de $\phi V_n \geq V_u$, donde ϕ es 0,6 (sección 8.1.4 del CSCR-10).

Flexión

Debido a las cargas aplicadas en la superficie donde el suelo y cimiento tienen contacto se produce el fenómeno de flexión en la cimentación, que genera una tracción en la parte inferior de esta. Como es bien sabido por estudios ya realizados en concreto es un material que trabaja eficazmente a compresión, caso contrario sucede a tracción, por lo tanto, se suele reforzar con varillas de acero en ambos sentidos para así evitar el fallo por tracción. El código ACI 318-19 en la sección 13.2.7 indica que la sección crítica a flexión para una cimentación aislada se ubica en la cara de la columna como se representa en la figura 19. Importante he de recalcar que para las cimentaciones que no requieran acero de refuerzo superior, se deberá colocar el acero mínimo (el mayor entre el A_s mínimo o de Temperatura).



(b) Tributary area for moment at section A-A.



(c) Moment about section A-A.

Figura 19. Sección crítica a flexión. Fuente: (Wight & MacGregor, 2012).

Cabe recalcar que para cimentaciones y columnas cuadradas el momento obtenido es igual para ambas direcciones si la carga es céntrica en caso contrario se debe de analizar para ambas direcciones y obtener los mayores esfuerzos.

Dirección x:

$$M_u = \frac{q_u}{2} \cdot \left(\frac{L-b}{2}\right)^2 B \quad (\text{ec.38})$$

Dirección y:

$$M_u = \frac{q_u}{2} \cdot \left(\frac{B-b}{2}\right)^2 L \quad (\text{ec.39})$$

En donde:

q_u = Esfuerzo último.

L = Largo de la cimentación en la dirección x.

B = Largo de la cimentación en la dirección y.

a = Cara del a columna en la dirección x.

b = Cara del a columna en la dirección y.

Una vez determinado el M_u se procede al cálculo de la cuantía de acero (para una sección de

1 m) necesaria para soportar las fuerzas a tracción a la que es expuesta la cimentación. Para esto (Cormac & Brown, 2018) en la página 71 a través de un factor de resistencia a flexión R_n el cual luego se sustituye en la ecuación 41 y se obtiene una cuantía de acero inicial. El factor R_n se determina de la siguiente manera:

$$R_n = \frac{M_u}{\phi b d^2} \quad (\text{ec.40})$$

Donde:

M_u = Momento obtenido en el diseño por flexión.

ϕ = Factor de reducción de resistencia 0,9 según tabla 21.2.1 del ACI 318-19.

b = Largo de 1 m (100 cm).

d = Distancia de la cara a compresión hasta el acero de refuerzo.

$$\rho = \frac{0,85f'_c}{f_y} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0,85f'_c}}\right) \quad (\text{ec.41})$$

Obtenida la cuantía de acero se calcula el área de acero requerida mediante la siguiente ecuación:

$$A_s = \rho b d \quad (\text{ec.42})$$

Una vez obtenida el área de acero se procede a verificar que A_s supere el área de acero mínimo A_{smin} indicado en la sección 7.6.1.1 del ACI 318-19, donde A_s tiene que ser mayor que el resultado da ambas ecuaciones. En caso de suceder lo contrario se tomará como nuevo A_s al valor de mayor obtenido de ambas ecuaciones. Las ecuaciones son las siguientes:

$$A_{smin(1)} = 0.0018bd \quad (\text{ec.43})$$

$$A_{smin(2)} = 0.0014bd \quad (\text{ec.44})$$

Donde:

b = Sección de 1 m (100cm) de la cimentación.

d = Distancia de la cara a compresión hasta el acero de refuerzo.

Obtenida el A_s se calcula el número total de varillas a utilizar de la siguiente forma:

$$\#V = \frac{A_s}{A_v} \quad (\text{ec.45})$$

Donde:

A_v = Es el área transversal de la varilla a utilizar.

Finalmente, una vez obtenida la cantidad de varillas a utilizar, se determina la separación (S), la cual no debe ser mayor a 45 cm (7.7.2.3 del ACI 318-19) con la utilización de la siguiente ecuación:

$$S = \frac{B-2rec}{\#V-1} \quad (\text{ec.46})$$

Donde:

rec = Recubrimiento de la cimentación.

B = Lado largo de la cimentación en la dirección y

- Costo de mano de obra, deben de contemplarse para cada actividad. Hay que tener presente que el costo de la mano de obra puede variar dependiendo la zona en donde se realice. Por tanto, es importante tenerlo en consideración al momento de realizar cualquier proyecto.
- Costo por actividad y subactividad, se debe presupuestar los materiales, mano de obra, subcontratos, etc., seguidamente a esto se obtienen el costo total de actividad al sumar el costo de cada una de las subactividades.
- Costos administrativos, imprevistos y utilidades, se deben contemplar de manera porcentual ya sea en el sector público o privado.

Una vez obtenidos todos los datos anteriores se determina el costo individual para cada cimentación. En resumen, se tiene que realizar un análisis de precios unitarios en donde se detalle exactamente los materiales y mano de obra que se utilizan para la elaboración de una cimentación.

Costos de construcción

Los costos de construcción se definen como la cantidad de dinero invertido en la fabricación de un producto (en este caso cimentaciones). Para llevar a cabo el cálculo total del costo por cimentación, se debe considerar los siguientes aspectos:

- Costos unitarios de los materiales, es importante mantener los datos actualizados de los productos, con los precios reales (incluyendo el IVA) suministrados por los proveedores.
- Cantidad de trabajo, se debe determinar la cantidad exacta por metro lineal, metro cuadrado, metro cubico, kg o el que según corresponda para cada actividad.

Metodología

Inicialmente, para cumplir con el objetivo uno se toman los modelos de SAP 2000 de los edificios, los cuales varían entre los dos y cinco pisos de altura. Las cimentaciones seleccionadas de cada edificio se nombraron con códigos de la siguiente forma para facilitar su identificación:

- BIB_#: Para las de la Biblioteca (2 plantas).
- VI_#: Para la ampliación del edificio de Viesa (2 plantas).
- COME_#: Para las del edificio nuevo de comedor (2 plantas).
- CL_#: Ampliación del edificio de Ciencias de Lenguaje (3 plantas).
- QUIM_#: Edificio nuevo de Química (4 plantas).
- LIMO_#: Para la Escuela de Limoncito (4 plantas).
- COMPU_#: Para el edificio nuevo de Computación (5 plantas).

Se ejecutó las corridas de los modelos y se obtuvieron las fuerzas actuantes sobre las cimentaciones a partir las combinaciones de cargas tanto de estados de servicio (estática y dinámica) como la de las solicitaciones últimas respectiva de cada edificación. Una vez obtenidas las combinaciones procede a la determinación de las dimensiones de cada una de las cimentaciones. Las dimensiones se calculan utilizando la ecuación 25, donde toda la expresión del lado derecho se iguala ($q_{adm} \geq$) las cargas admisibles propuestas de 10 ton/m² (para suelos de baja capacidad soportante) y 30 ton/m² (para suelos de alta capacidad soportante).

Como se trabaja con cimentaciones aisladas cuadradas, por ende, B=L. Una vez obtenidas las dimensiones iniciales se procede a verificar para estados de servicio estáticos y dinámicos (con sismo), donde los esfuerzos debajo de las cimentaciones no excedan las capacidades admisibles de cada uno de los dos suelos propuestos. En el caso donde los esfuerzos debajo de las cimentaciones fueron mayores a los de las capacidades admisibles, se procede al ajuste de las

dimensiones hasta llegar a valores menores a los admisibles. Seguidamente, se procede a elegir las dimensiones mayores que se hayan obtenidos, ya sea de los estados de servicio estático o los dinámicos.

Una vez obtenidas las dimensiones de las cimentaciones por usar, se procede a la realización del objetivo dos, donde se modelarán en el SAP2000 (usando MEF) las cimentaciones utilizando el método de Winkler que representa el suelo como un conjunto de resortes. Esto resortes se modelarán con la ayuda del programa de SAP2000. Sin embargo, como el método de Winkler presenta algunas objeciones antes mencionadas con respecto a que el coeficiente de balastro no está en función de las características del suelo. Se utilizan las funciones de impedancias propuestas por (Gazetas, 1991), en específico tomar las ecuaciones para el cálculo de rigideces traslacionales y rotacionales de los resortes que simulan al suelo.

Es importante mencionar que la parte que representa la amortiguación en las funciones de impedancia no será tomada en cuenta, debido a que solo se modelan las cimentaciones y no toda la estructura del edificio, donde sí es importante el considerar la amortiguación causada por el suelo sobre el edificio. Los pasos para el cálculo de las rigideces usando las funciones de impedancia se representan en el ejemplo de una cimentación en la sección de "*Modelación considerando y no la interacción suelo-estructura*". A partir de los modelos se obtienen los esfuerzos internos de cortante y momento para el posterior diseño de las cimentaciones.

Una vez aclarado el objetivo dos, se procede a completar el objetivo tres, el cual es la modelación de las cimentaciones en el programa de SAP 2000 (usando MEF) utilizando el método rígido convencional. El cual consiste en representar los esfuerzos debajo de la cimentación como una sobrepresión como las mostradas en las figuras 9 y 16. Las magnitudes de la sobrepresión se obtendrán usando la ecuación 25, donde se determinará un q_{min} y un q_{max} para cada una de las cimentaciones de forma individual. La carga axial y los momentos utilizado para la obtención de las excentricidades son obtenidos de los resultados de las solicitaciones últimas estática y dinámica de los modelos en SAP 2000 de los edificios. Esto se detallará de forma clara en el ejemplo que se realiza en la sección de "*Modelación considerando y no la interacción suelo-estructura*". A partir de los

modelos se obtienen los esfuerzos internos de cortante y momento para el posterior diseño de las cimentaciones.

Para realizar el objetivo cuatro que corresponde al diseño de las cimentaciones, se utiliza el libro de "Diseño de Concreto Reforzado" (Cormac & Brown, 2018) que utiliza como referencia la guía ACI 318-14. Importante hay que aclarar que la última versión del ACI 318 es la 2019 (ACI 318-19), por tanto, se compara cada apartado de la versión 2014 con la 2019 donde se especifica el diseño para la cimentación. De esa manera se realiza el diseño bajo los criterios de la última versión de ACI 318 y CSCR-2010. Donde se determina la cantidad de acero de refuerzo requerido para la flexión y la revisión del cortante en la cimentación.

Finalmente, obtenido el diseño final de las cimentaciones se realiza el objetivo cinco donde se hace una comparación de las diferencias que se presentan en las cimentaciones tanto de manera cualitativa y cuantitativa. Para posteriormente realizar una comparación económica en el diseño de las cimentaciones elegidas y determinar la existencia significativa de un aumento en el costo o no al usar el método rígido convencional o el método ISE para el diseño de una cimentación.

Para determinar el costo unitario total para la construcción de una cimentación, se calculó el costo de los materiales y de la mano de obra (con sus cargas sociales del 37% del porcentaje de planilla) mediante rendimientos, definiendo unidades de medida utilizadas en Costa Rica (unidades, kilogramos, metros lineales, metros cuadrados o metros cúbicos). Al sumar cada uno de estos ítems se obtiene el costo por subactividad, a su vez, la suma del costo de las subactividades da como resultado el costo de la actividad (costo directo o CD). Una vez calculado los costos directos se determina los costos indirectos los cuales son un porcentaje de los costos directos. Sumado los costos directos e indirectos se calculan los imprevistos y las utilidades cuya magnitud va en función de un porcentaje de la suma total de los costos directos e indirectos.

Mediante la revisión de ofertas de licitaciones para la construcción se consideró un porcentaje de 7% para los costos indirectos, 5% para los imprevistos y un 10% para las utilidades, ya que son valores promedios. Cabe resaltar que estos valores son relativos y están sujetos a las características de cada proyecto y de la empresa que los realiza. De igual forma los rendimientos por

actividades pueden variar por distintos factores (climáticas, terreno, conformación de cuadrilla, etc.) de una empresa a otra. Se realizará un ejemplo de cálculo para determinar el costo unitario para la construcción de una cimentación (ver en la sección de "Modelación considerando y no la ISE").

Modelación con y sin interacción suelo-estructura

En el presente apartado se lleva a cabo como ejemplo el análisis y diseño de una cimentación elegida entre el grupo. La cimentación elegida es la BIB_3, la cual forma parte del sistema de cimentación para el proyecto de ampliación para los servicios de biblioteca del ITCR. La cimentación es elegida debido a que presenta unas dimensiones promedio, siendo esta mayor a 1,5 metros y menos de 4 metros.

Modelación con ISE

Características de los suelos

Al momento de realizar la ISE es importante tener las características propias de cada uno de los dos suelos que se utilizan en el presente trabajo. Debido a que se contaba con estudios de suelos para cada edificio, al tomar las características de cada uno, dificultaría las comparaciones. Por tanto, se propusieron dos suelos con capacidades admisibles de 10 Ton/m² y 30 Ton/m² y se utilizaron valores de referencia obtenidos de diversas fuentes bibliográficas. Los suelos se asumen como tipo S₃ según lo indicado el CSCR-10 en la sección 2.2.

Aclarado una vez esto, las propiedades que se utilizaron para cada uno de los dos tipos de suelos son las siguientes:

- Los coeficientes de balastro k_s son tomados del cuadro 2, para el suelo de 10 Ton/m² (igual a 1kg/cm²) es de 2,2 kg/cm³ y para el suelo de 30 Ton/m² (igual a 3 kg/cm²) es de 6,0 kg/cm³.
- Los coeficientes de Poisson ν fueron obtenidos del artículo en internet publicado por (Piqueras, 2019), de ahí se toma un

coeficiente de Poisson de 0,4 (arcillas blandas normalmente consolidadas) para el suelo de 10 Ton/m² y 0,3 (arcillas medias) para el suelo de 30 Ton/m².

- La velocidad de onda de corte se obtiene de la tabla 2.2 del CSCR -10, para suelo S₃ el rango esta entre los 180 – 350 m/s, sin embargo, se toma el promedio de ambas para ser conservador y no estar en los extremos. Con esto la velocidad que se toma es de 265 m/s para ambos suelos.
- La densidad propuesta por utilizar para ambos suelos es de 1,8Ton/m³ como referencia.

Obtención de reacciones

Para la obtención de las reacciones para la cimentación del edificio, se toma de la modelación realizada en SAP 2000 del edificio (ya con todas las cargas correspondientes) que se representa en la figura 20.

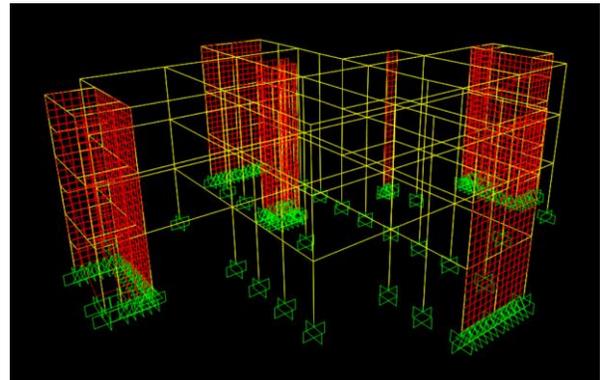


Figura 20. Modelo de edificio en SAP2000 . Fuente: (Peralta, Modelo SAP2000 de Edificio).

Al correr el modelo se obtienen las fuerzas resultantes de las bases de las columnas donde se ubican las cimentaciones. En la figura 21 se encuentra las reacciones en la base de la columna donde se ubica la cimentación elegida (BIB_3). Donde se utilizan las 21 combinaciones mencionadas en el marco teórico sobre los factores de carga.

OutputCase	CaseType	F1	F2	F3	M1	M2	M3	
Text	Text	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m	
1.4CM	Combination	-25,93	-68,42	67641,08	87,32	-11,05	-0,7	SU.estáticas
1.2CM+1.6CV	Combination	-51,96	-1376,86	116777,38	1805,5	-37,24	-0,16	
1.05CM+0.5CV+1CSx+0.3CSy	Combination	-629,09	-905,4	66044,86	1436	-1512,52	-0,16	SU.dinam
1.05CM+0.5CV-1CSx+0.3CSy	Combination	573,39	-705,56	69677,15	1167,87	1478,44	-4,97	
1.05CM+0.5CV+1CSx-0.3CSy	Combination	-630,87	-220,95	68534,04	44,76	-1512,37	4,2	
1.05CM+0.5CV-1CSx-0.3CSy	Combination	571,61	-21,11	72166,33	-223,36	1478,58	-0,61	
1.05CM+0.5CV+1CSy+0.3CSx	Combination	-206,14	-1633,98	64412,11	2965,26	-465,85	-6,92	
1.05CM+0.5CV-1CSy+0.3CSx	Combination	-212,09	647,52	72709,39	-1672,19	-465,37	7,6	
1.05CM+0.5CV+1CSy-0.3CSx	Combination	154,61	-1574,03	65501,79	2884,83	431,43	-8,37	
1.05CM+0.5CV-1CSy-0.3CSx	Combination	148,66	707,47	73799,08	-1752,63	431,92	6,15	
CM+CV	Combination	-37,1	-872,76	85064,63	1144,03	-25,25	-0,22	cod.serv.est
1.1CM+0.5CV+Csx	Combination	-630,91	-565,62	69705,2	743,5	-1512,84	1,99	cod.serv.dinm
1.1CM+0.5CV+Csy	Combination	-26,69	-1606,45	67372,7	2928,16	-17,6	-7,67	
0.95CP+0.5CT+CSx+0.3CSy	Combination	-627,24	-900,52	61213,35	1429,76	-1511,73	-0,11	SU.dinam
0.95CP+0.5CT-CSx+0.3CSy	Combination	575,24	-700,68	64845,64	1161,64	1479,23	-4,92	
0.95CP+0.5CT+CSx-0.3CSy	Combination	-629,02	-216,07	63702,54	38,53	-1511,58	4,25	
0.95CP+0.5CT-CSx-0.3CSy	Combination	573,46	-16,23	67334,83	-229,6	1479,37	-0,56	
0.95CP+0.5CT+0.3CSx+CSy	Combination	-204,29	-1629,1	59580,6	2959,03	-465,06	-6,87	
0.95CP+0.5CT-0.3CSx+CSy	Combination	156,46	-1569,15	60670,29	2878,59	432,22	-8,32	
0.95CP+0.5CT+0.3CSx-CSy	Combination	-210,23	652,4	67877,89	-1678,43	-464,58	7,64	
0.95CP+0.5CT-0.3CSx-CSy	Combination	150,51	712,36	68967,57	-1758,87	432,71	6,2	

Figura 21. Reacciones para diseño de cimentación BIB 3. Fuente: Elaboración propia.

Los datos que se utilizan son los de la columna F3 (Carga Axial), M1 y M2 los cuales son los momentos en los ejes "x" y "y" respectivamente según el programa SAP2000. Las reacciones para las demás cimentaciones se encuentran en los cuadros del 10 al 13. La ubicación de la cimentación BIB_3 en planta se representa en la figura 22.

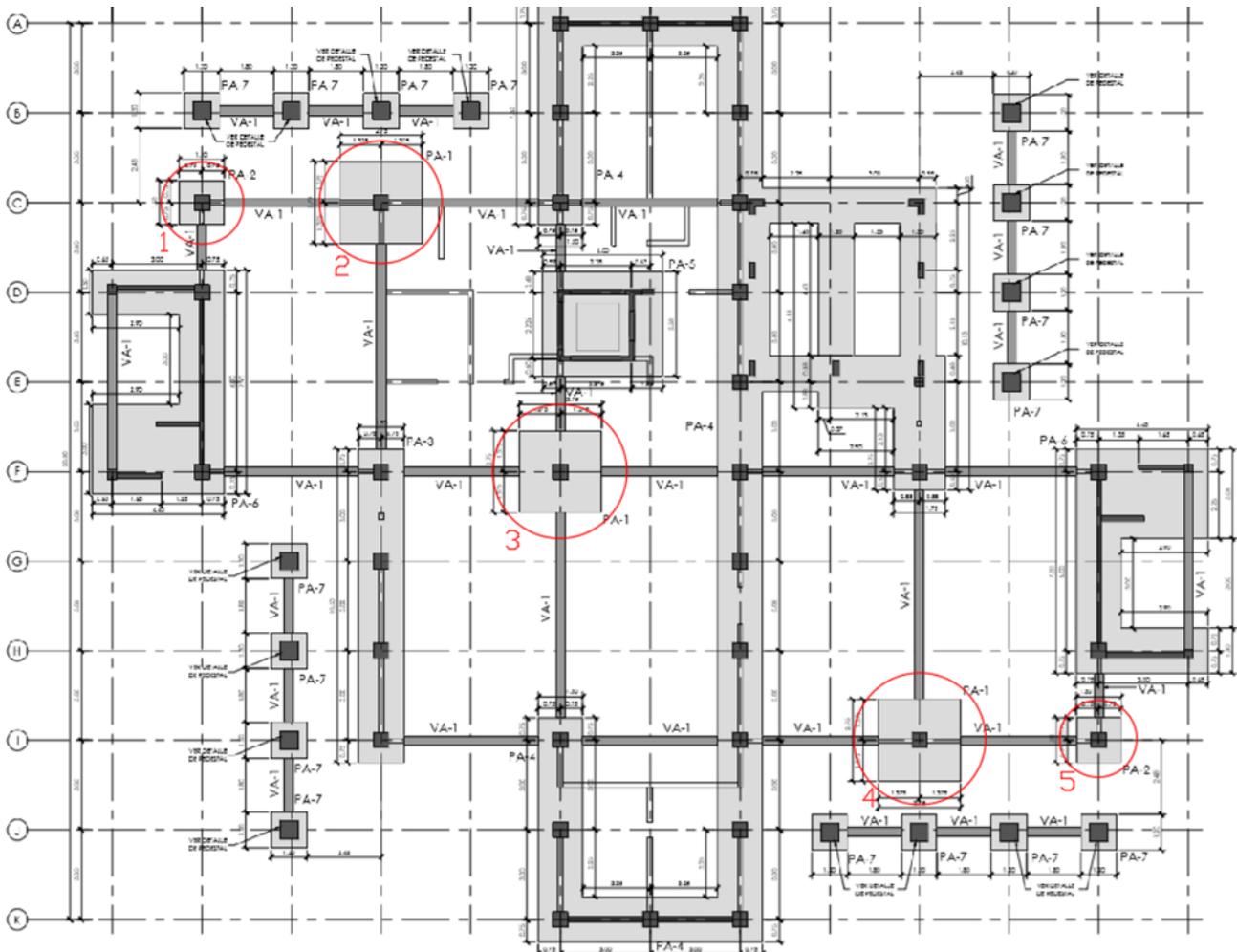


Figura 22. Ubicación en planta de BIB_3 (la del centro encerrada en cirulo rojo con el número 3 en la parte inferior). Fuente: (Peralta, Planos Constructivos de Edificio, 2020).

Dimensionamiento

Con la obtención de las reacciones (usando las ecuaciones 19, 20 y 21), así como el peso propio de la cimentación y el suelo por encima de ella (1800 kg/m² para cimentaciones de 50 cm de espesor y 1620 kg/m² para las cimentaciones de 60 cm de espesor) se determinan las dimensiones de la cimentación. Como es una placa aislada cuadrada L=B y se obtienen utilizando la ecuación 24, con lo que la ecuación queda como $q_{adm} \geq \frac{P}{L \cdot L} \cdot \left(1 \pm \frac{6e_b}{L} \pm \frac{6e_L}{L}\right)$, con L como variable incógnita e igualando el lado derecho al q_{adm} , siendo menor o igual a la capacidad admisible de 1kg/cm² (suelo de 10Ton/m²) y 3kg/cm² (suelo de 30 Ton/m²). Donde

se obtiene después de varias iteraciones las dimensiones presentadas en el cuadro 3 que logran satisfacer la ecuación 24. La dimensión de la columna es de 50x50 cm (la misma de los planos estructurales).

CUADRO 3. Dimensiones de placa BIB_3				
Placa	$q_{adm} 10 \text{ Ton/m}^2$		$q_{adm} 30 \text{ Ton/m}^2$	
	L (m)	B(m)	L (m)	B(m)
BIB_3	3,7	3,7	1,9	1,9

Fuente: Elaboración propia.

Obtenidas las longitudes de L y B se define el espesor en el apartado de "Espesor de zapata" del marco teórico, se indica que la altura o espesor mínimo debe de ser al menos 25 cm, para la

cimentación BIB_3 se propone un espesor de 50 cm.

Cálculo Rigideces de Resortes

Al realizar el método de Interacción Suelo-Estructura (ISE), se modela el suelo como una cama de resortes, donde cada uno debe tener una rigidez tanto vertical (producto de cargas verticales), como rotacionales en los sentidos “x” y “y” producto de los momentos que se aplican a la cimentación. Para determinar las rigideces se utilizan las funciones de impedancia propuestas por (Gazetas, 1991), donde la rigidez dinámica se denota con la ecuación 14. Para determinar cada una de las variables que componen la ecuación 14, se utilizan las tablas presentadas en las figuras 11, 12 y 13.

La figura 11 presentan la rigidez estática de zapatas rígidas en la superficie del suelo. Se toman únicamente ecuaciones de $K_{z,sur}$ para la rigidez vertical, $K_{yy,sur}$ para la rigidez en “x” (debido a que es alrededor del eje de “y”) y $K_{xx,sur}$ para la rigidez en “y” (debido a que es alrededor del eje de “x”), ver figura 23.

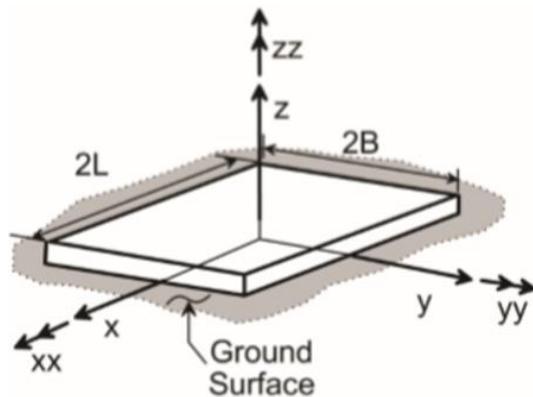


Figura 23. Guía de ejes para la rigidez de la cimentación. Fuente: (National Earthquake Hazards Reduction Program(NEHRP), 2012).

La figura 12 presenta los factores de corrección de empotramiento para la rigidez estática. Se toman únicamente ecuaciones de η_z para la rigidez vertical, η_{yy} para la rigidez en X (debido a que es alrededor del eje de Y) y η_{yy} para la rigidez en Y (debido a que es alrededor del eje de X).

La figura 13 presenta los modificadores de rigidez dinámica. Se toman únicamente ecuaciones de α_z para la rigidez vertical, α_{yy} para la rigidez en X y α_{yy} para la rigidez en Y. La rigidez estática, los factores de corrección de empotramiento y los modificadores de rigidez dinámica a su vez están en función de otras variables las cuales se presentan en la figura 24.

$$k_j = K_j \times \alpha_j \times \eta_j$$

$$K_j = GB^m f(B/L, \nu), \quad \alpha_j = f(B/L, a_0)$$

$$\eta_j = f(B/L, D/B, d_w/B, A_w/BL)$$

Figura 24. Guía de ejes para la rigidez de la cimentación. Fuente: (National Earthquake Hazards Reduction Program(NEHRP), 2012)

Donde G es el módulo de corte del suelo, ν es la relación de Poisson del suelo y B y L son las dimensiones de la cimentación como se indicó anteriormente en el marco teórico. Por otra parte, α_0 que es una frecuencia adimensional, d_w como la altura de contacto efectiva con la pared lateral (puede ser menor que la altura total de la cimentación) y A_w como el área de contacto sólido de la pared lateral, para una altura de contacto efectiva constante, d_w , a lo largo del perímetro.

Continuando se procede al cálculo de la rigidez estática, los factores de corrección de empotramiento y los modificadores de rigidez dinámica en ese mismo orden. Para la rigidez estáticas se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$K_{z,sur} = \frac{2GL}{1-\nu} \left[0.73 + 1.54 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.75} \right] \quad (\text{ec.47})$$

$$K_{yy,sur} = \frac{G}{1-\nu} (I_y)^{0.75} \left[3 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.15} \right] \quad (\text{ec.48})$$

$$K_{xx,sur} = \frac{G}{1-\nu} (I_x)^{0.75} \left(\frac{L}{B} \right)^{0.25} \left[2.4 + 0.54 \left(\frac{B}{L} \right) \right] \quad (\text{ec.49})$$

Donde:

I_x, I_y = Momento de inercia del área de contacto suelo-cimiento en dirección x, y.

El módulo de corte del suelo G , se calcula de la siguiente manera:

$$G = \frac{E_s}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (\text{ec.50})$$

Donde E_s es el módulo de elasticidad del suelo en cual se obtiene con la siguiente ecuación:

$$E_s = k_s B \cdot (1 - \nu^2) \cdot I_f \quad (\text{ec.51})$$

Donde k_s es el coeficiente de balastro y I_f es un valor que varía dependiendo la forma de la cimentación. Para placas cuadradas es de 0,88 y para placas circulares es de 0,785, sin embargo, como las placas propuestas son cuadradas se utiliza el primer valor cuando I_f es 0,88. Obtenidos los valores se calcula E_s para la cimentación en ambos suelos. Para el suelo de 10 Ton/m² de q_{adm} , se convierte el k_s de 2,2 kg/cm³ a 2200000 kg/m³ y se tiene:

$$\begin{aligned} E_s &= 2200000 \cdot 3,7 \cdot (1 - 0,4^2) \cdot 0,88 \\ E_s &= 6017088,00 \text{ kg/m}^2 \\ G &= 2148960,00 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

Para el suelo de 30 Ton/m² de q_{adm} , se convierte el k_s de 6,0 kg/cm³ a 6000000 kg/m³ y se tiene:

$$\begin{aligned} E_s &= 2200000 \cdot 1,9 \cdot (1 - 0,4^2) \cdot 0,88 \\ E_s &= 9129120,00 \text{ kg/m}^2 \\ G &= 3511200,00 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

Las I_x y I_y se determinan como:

$$I_x = \frac{L \cdot B^3}{12} \quad (\text{ec.52})$$

$$I_y = \frac{B \cdot L^3}{12} \quad (\text{ec.53})$$

Debido por su forma cuadrada $I_x = I_y$, el resultado de las inercias es igual a 15,618 m⁴ y 1,086 m⁴ para la cimentación de los suelos de 10 y 30 Ton/m² de q_{adm} respectivamente. Una vez obtenidos todos los valores necesarios para determinar la rigidez estática, se obtienen los siguientes resultados:

$$K_{z,sur} = 60163716,80 \text{ kg/m}$$

$$K_{yy,sur} = 84414601,33 \text{ (kg} \cdot \text{m)/rad}$$

$$K_{xx,sur} = 81600781,29 \text{ (kg} \cdot \text{m)/rad}$$

Para la cimentación del suelo de 10 Ton/m² de q_{adm} y para la cimentación del suelo de 30 Ton/m² de q_{adm} se obtienen los siguientes valores:

$$K_{z,sur} = 43268016,00 \text{ kg/m}$$

$$K_{yy,sur} = 16008610,97 \text{ (kg} \cdot \text{m)/rad}$$

$$K_{xx,sur} = 15474990,61 \text{ (kg} \cdot \text{m)/rad}$$

Obtenidas las rigideces estáticas de la cimentación para ambos suelos se procede a determinar los factores de corrección de empotramiento, donde se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\eta_z = \left[1 + \frac{D}{21B} \cdot \left(1 + 1,3 \frac{B}{L} \right) \right] \left[1 + 0,2 \cdot \left(\frac{A_w}{4BL} \right)^{2/3} \right] \quad (\text{ec.54})$$

$$\eta_{yy} = 1 + 0,92 \cdot \left(\frac{d_w}{B} \right)^{0,6} \left[1,5 + \left(\frac{d_w}{B} \right)^{1,9} \left(\frac{B}{L} \right)^{-0,6} \right] \quad (\text{ec.55})$$

$$\eta_{xx} = 1 + 1,26 \frac{d_w}{B} \left[1 + \frac{d_w}{B} \cdot \left(\frac{d_w}{D} \right)^{-0,2} \sqrt{\frac{B}{L}} \right] \quad (\text{ec.56})$$

Donde D es el nivel de desplante propuesto es de 1,5, d_w es el espesor de la cimentación, el cual se propuso en la sección anterior de dimensionamiento y es de 50 cm. A_w es el área lateral de la cimentación, que se obtiene con la siguiente ecuación:

$$A_w = 4Bd_w \quad (\text{ec.57})$$

Para la cimentación en el suelo con 10 Ton/m² de q_{adm} $A_w = 4 \cdot 3,7 \cdot 0,5 = 7,4 \text{ m}^2$ y para la cimentación en el suelo de 30 Ton/m² de q_{adm} $A_w = 4 \cdot 1,9 \cdot 0,5 = 3,8 \text{ m}^2$. Una vez obtenidos todos los valores necesarios para determinar los factores de corrección de empotramiento, se obtienen los siguientes resultados:

$$\eta_z = 1,05$$

$$\eta_{yy} = 1,45$$

$$\eta_{xx} = 1,20$$

Para la cimentación del suelo de 10 Ton/m² de q_{adm} y para la cimentación del suelo de 30 Ton/m² de q_{adm} se obtienen los siguientes valores:

$$\eta_z = 1,09$$

$$\eta_{yy} = 1,67$$

$$\eta_{xx} = 1,44$$

Obtenidos los factores de corrección de empotramiento se procede a determinar los modificadores de rigidez dinámica, donde se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\alpha_z = 1,0 - \left[\frac{\left(0,4 + \frac{0,2}{L/B}\right) \cdot \alpha_0^2}{\left(\frac{1,0}{1 + 3 \cdot \left(\frac{L}{B} - 1\right)} + \alpha_0^2\right)} \right] \quad (\text{ec.58})$$

$$\alpha_{yy} = 1,0 - \left[\frac{0,55 \alpha_0^2}{\left(2,4 - \frac{0,4}{(L/B)^3}\right) + \alpha_0^2} \right] \quad (\text{ec.59})$$

$$\alpha_{xx} = 1,0 - \left[\frac{\left(0,55 + 0,01 \sqrt{\frac{L}{B} - 1}\right) \cdot \alpha_0^2}{\left(2,4 - \frac{0,4}{(L/B)^3}\right) + \alpha_0^2} \right] \quad (\text{ec.60})$$

Donde α_0 es una frecuencia adimensional que depende de la frecuencia ω (expresada en rad/s) relacionada al período dominante de la estructura (edificio), las dimensiones del cimiento y la velocidad de onda de corte del suelo. Lo anterior dicho se representa en la siguiente ecuación:

$$\alpha_0 = \frac{\omega B}{V_s} \quad (\text{ec.61})$$

Para determinar ω se obtiene el período dominante del edificio. El período se obtiene del modelo en SAP 2000 del edificio ver figura 25.

StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY
Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
Mode	1	0,163835	0,703	0,072	0,00005436	0,703	0,072
Mode	2	0,161778	0,068	0,764	0,00002904	0,771	0,835
Mode	3	0,10908	0,0009599	0,00006524	0,00002278	0,772	0,836
Mode	4	0,055182	0,00007436	0,131	0,0001156	0,772	0,966
Mode	5	0,053939	0,000006864	0,0004721	0,068	0,772	0,967
Mode	6	0,051924	1,053E-09	0,00004309	0,034	0,772	0,967
Mode	7	0,051076	9,328E-07	0,00008506	0,058	0,772	0,967
Mode	8	0,048981	0,0007691	0,00002334	0,033	0,773	0,967
Mode	9	0,048746	0,189	0,0001261	0,0000521	0,961	0,967
Mode	10	0,044742	0,00000197	3,359E-09	0,071	0,961	0,967
Mode	11	0,04382	0,00005126	0,00003997	0,005027	0,961	0,967
Mode	12	0,042221	0,00000159	4,683E-07	0,043	0,961	0,967

Figura 25. Modos de vibración del edificio del Biblioteca. Fuente: Elaboración propia.

Por lo general, el período suele estar asociado al primer modo de vibración, sin embargo, para este edificio el período elegido es el del segundo modo debido a que hay un mayor porcentaje de participación de la masa en la dirección Y. Por tanto, el período es de $T = 0,161778$ segundos. La frecuencia $f = \frac{1}{T}$ es de 6,1813 Hz y para pasarla a radianes se multiplica por 2π , dando como resultado $\omega = 38,8383$ rad/s. Por tanto, α_0 es:

$$\alpha_0 = \frac{38,8383 \cdot 3,7}{265} = 0,5422$$

$$\alpha_0 = \frac{38,8383 \cdot 1,9}{265} = 0,2784$$

Una vez obtenidos todos los valores necesarios para determinar los modificadores de rigidez dinámica, se obtienen los siguientes resultados:

$$\alpha_z = 0,9829$$

$$\alpha_{yy} = 0,9295$$

$$\alpha_{xx} = 0,9295$$

Para la cimentación del suelo de 10 Ton/m² de q_{adm} y para la cimentación del suelo de 30 Ton/m² de q_{adm} se obtienen los siguientes valores:

$$\alpha_z = 0,9954$$

$$\alpha_{yy} = 0,9795$$

$$\alpha_{xx} = 0,9795$$

Obtenidos los valores de la rigidez estática, los factores de corrección de empotramiento y los modificadores de rigidez dinámica, se calcula la rigidez dinámica k_j usando la ecuación 14. Donde

para el suelo de 10 Ton/m² de q_{adm} se tienen las siguientes rigideces dinámicas k_j :

$$\begin{aligned} k_z &= 61833305,76 \text{ (kg/m)} \\ k_{yy} &= 113741458,32 \text{ (kg} \cdot \text{m)/rad} \\ k_{xx} &= 90936622,98 \text{ (kg} \cdot \text{m)/rad} \end{aligned}$$

Y para el suelo de 30 Ton/m² se obtienen las siguientes rigideces dinámicas:

$$\begin{aligned} k_z &= 47008237,77 \text{ (kg/m)} \\ k_{yy} &= 26196042,40 \text{ (kg} \cdot \text{m)/rad} \\ k_{xx} &= 21830758,86 \text{ (kg} \cdot \text{m)/rad} \end{aligned}$$

Sin embargo, las rigideces k_j obtenidas son concentradas en un solo punto (en un resorte) de la cimentación y tienen que ser discretizadas, de esa manera se distribuye de una forma consistente entre el número de resortes que posee verdaderamente la cimentación. Para llevarlo a cabo, la rigidez k_j debe dividirse entre el área de la cimentación, para luego multiplicarlo por las áreas tributarias para cada resorte. El concepto de área tributaria se aprecia de manera gráfica en la figura 26, donde se aprecian tres tipos de áreas, las cuales son las centrales, las laterales y por ultimo las esquineras.

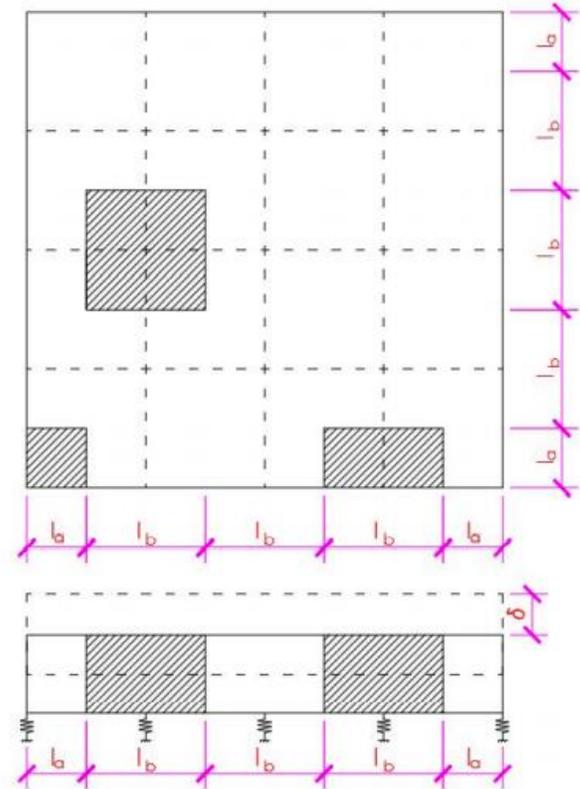


Figura 26. Áreas tributarias de los resortes. Fuente: (Peralta, Interacción Suelo – Estructura: "Un cambio en el paradigma de Cálculo", 2018).

Para determinar el área tributaria primero se elige un tamaño de los cuadros para la malla de elementos finitos el cual se define en cuadrados de 10x10 cm. Se toma esta medida porque según los resultados en la tesis de (Guerra, Moreira, & Meyleen, 2019) donde determinan que "Se puede observar el comportamiento lineal de los momentos hasta la discretización de 0,067 m aproximadamente. Luego, empieza a tener una conducta constante con respecto a los momentos pudiendo demostrar que la discretización no influye en los resultados una vez que alcanza una discretización promedio". Esto en referencia a la discretización de los cuadrados del mallado que ellos hicieron para unas cimentaciones cuadradas en su tesis de investigación.

Definidas las dimensiones de los cuadrados de la malla, se determina el área tributaria para cada resorte. Donde el área para cada uno de los tres resortes (central, lateral y esquinero) es:

$$A_{res,Central} = 0,1 \cdot 0,1 = 0,01 \text{ m}^2$$

$$A_{res,Lateral} = \frac{A_{res,Central}}{2} = 0,005 \text{ m}^2$$

$$A_{res,Esquinero} = \frac{A_{res,Lateral}}{2} = 0,0025 \text{ m}^2$$

Estas áreas tributarias se aplican para el mallado de la cimentación por diseñar en ambos suelos. Las áreas totales de las cimentaciones son de 13,69 m² para la del suelo de 10 Ton/m² y 3,61 m² para la del suelo de 30 Ton/m². Obtenidas tanto el área total de la cimentación como el área tributaria de los resortes, se calcula las rigideces de cada uno de los resortes individuales y se representan en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. Valores de rigidez para resortes de la cimentación BIB_3			
k_j	Central (kg/m)	Lateral (kg·m)/rad	Esquinero (kg·m)/rad
Para suelo de q_{adm} 10 Ton/m ²			
k_z	45166,768	22583,384	11291,692
k_{yy}	83083,607	41541,804	20770,902
k_{xx}	66425,583	33212,791	16606,396
Para suelo de q_{adm} 30 Ton/m ²			
k_z	130216,725	65108,363	32554,181
k_{yy}	72565,214	36282,607	18141,304
k_{xx}	60473,016	30236,508	15118,254

Fuente: Elaboración propia.

Las rigideces de las demás cimentaciones se pueden ver en la sección de apéndices (ver apéndice 3).

Modelación en SAP 2000

Obtenidos las rigideces individuales para cada resorte se modela la cimentación BIB_3 para el suelo de 10 Ton/m² para presentar el proceso necesario para la modelación es SAP 2000. Lo primero es definir el material que forma la cimentación, el cual es un concreto con un f'c de 245 kg/cm² que suele ser utilizado para el diseño de cimentaciones. Las características se definen en el SAP como se presenta en la siguiente figura:

Figura 27. Definición del concreto en SAP 2000. Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente, se define la sección área de la cimentación de la forma en que se representa en la figura 28. Los valores de 0,7 encerrados en la elipse de la figura 28, se introducen para que el programa defina que se da el agrietamiento del concreto.

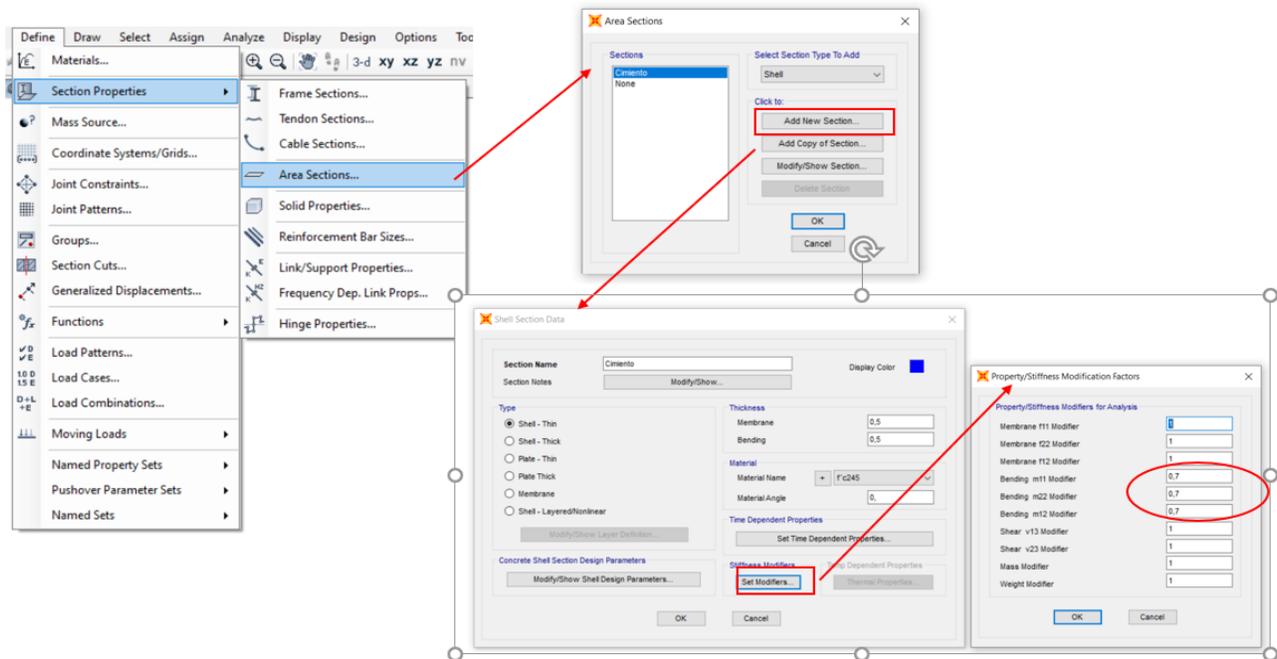


Figura 28. Definición de la sección área de la cimentación. Fuente: Elaboración propia.

Definida la sección de área se procede a la creación del mallado por el MEF (Método de Elementos Finitos), con las dimensiones de B y L de 3,7 m y una discretización de sus cuadrados de 10x10 cm representado en la figura 29.

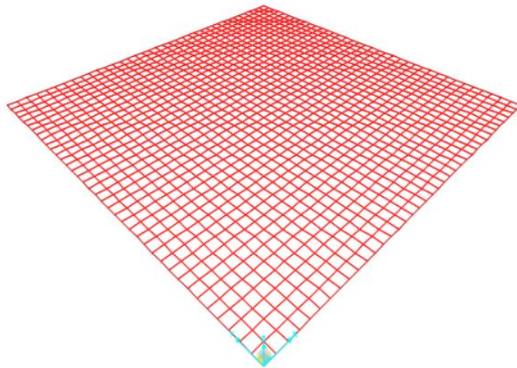


Figura 29. Modelo plano de la cimentación BIB_3. Fuente: Elaboración propia.

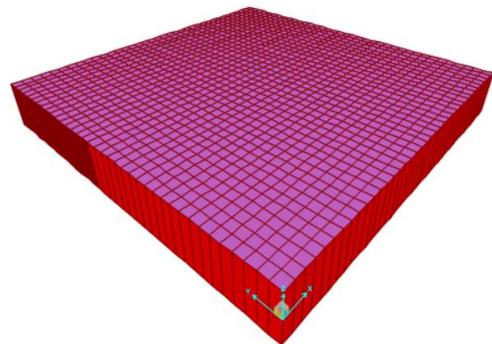


Figura 30. Modelo extruido de la cimentación BIB_3. Fuente: Elaboración propia.

Realizada la sección de la cimentación se procede a la asignación de los resortes (links) que simulan el suelo. La figura siguiente muestra los pasos por realizar en el programa SAP2000:

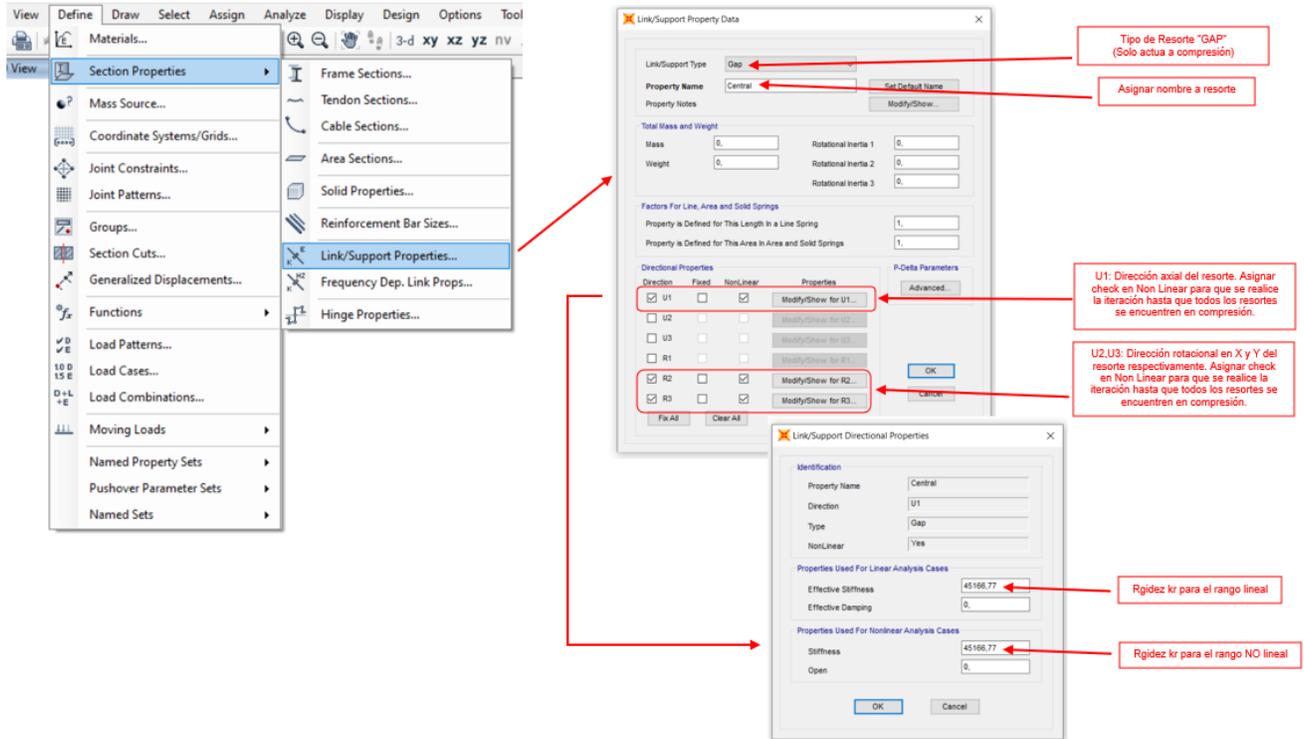


Figura 31. Asignación de los resortes para la cimentación BIB_3. Fuente: Elaboración propia.

Una vez cargada las propiedades de los resortes en el modelo de SAP2000, se procede a la colocación de estos en la sección de la cimentación de la forma presentada en la siguiente figura:

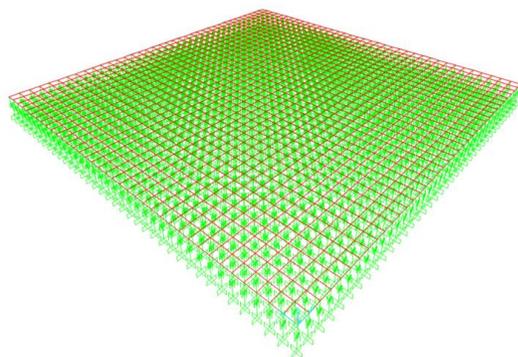
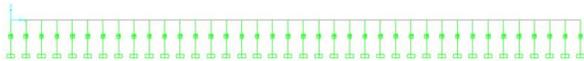


Figura 32. Colocación de los resortes para la cimentación BIB_3. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, como último paso para la modelación de la cimentación, se aplican directamente las solicitaciones últimas

provenientes del análisis estructural del edificio sobre el modelo (donde va la columna). Se toman los valores máximo-absolutos (ver figura 21) de las solicitaciones últimas estática (marcado en rojo) y dinámicas (marcado en amarillo). La siguiente figura muestra la cimentación con las cargas aplicadas:

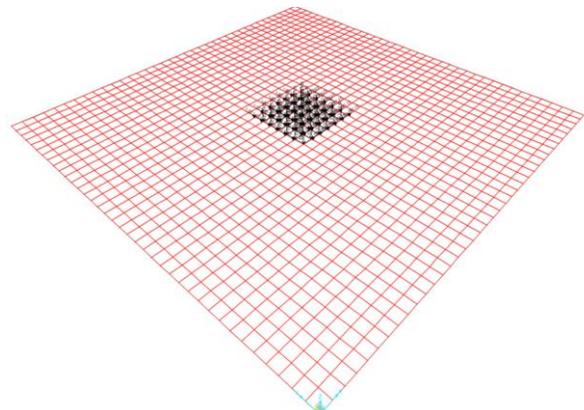


Figura 33. Colocación de las cargas en la cimentación BIB_3. Fuente: Elaboración propia.

Una vez modelada la cimentación con sus respectivas cargas se corre y se obtienen los esfuerzos internos de momento flector y cortante

(ver cuadro 5) para posteriormente diseñarla a través de la teoría para diseño de concreto reforzado. La siguiente figura se muestran los diagramas de la distribución esfuerzos por momento flector en las direcciones de "x" e "y" (izquierda) e "y" (derecha).

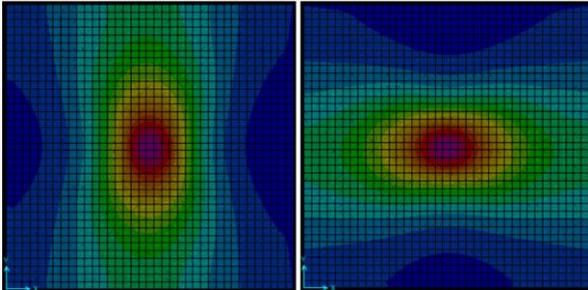


Figura 34. Distribución de esfuerzo por momento flector en "x" e "y" para la cimentación BIB_3. Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 5. Valores de los esfuerzos para la cimentación BIB_3 con ISE				
Placa	Para (L=B=3,7m)		Para (L=B=1,9m)	
	M _u (kg-m)	V _u (kg)	M _u (kg-m)	V _u (kg)
BIB_3	20664,2 3	49471,8 5	14575,1 7	46201,8 2

Fuente: Elaboración propia.

Acero a flexión y Cortante

La memoria de cálculo para la cuantía de acero y la revisión para el cortante se encuentra en la sección de apéndices.

Cálculo de costos

El procedimiento para determinar el costo unitario de la cimentación BIB_3 donde se considera la ISE da inicio con la siguiente ecuación para determinar el costo de los distintos materiales:

$$A = \text{cantidad}(\text{und}, \text{kg}, \text{m}^3) \times \text{precio und} \quad (\text{ec.62})$$

$$B = \text{cantid}(\text{kg}, \text{m}^3) \times \text{rendim} (\text{HH}) \times \text{costo}(\text{HH}) \quad (\text{ec.63})$$

Donde:

- A: Costo de materiales.
- B: Costo de mano de obra.

Los materiales considerados para el cálculo son los siguientes:

CUADRO 6. Precio de materiales			
Material	Costo Unitario (₡)	Costo Unitario (\$)	Unidad
Varilla #5 G-60	4430	7,34	Unidad
Alambre negro	660	1,09	kg
Concreto f'c 245	78000	144,05	m ³

Fuente: Elaboración propia, datos extraídos de CONSTRUPLAZA y Grupo Orosi.

Se inicia el cálculo del costo de los materiales (solo para la cimentación de 3,6 m de lado).

Para varilla #5 G-60 (incluye 10% de desperdicio):

$$A = 35 \text{ und} \times 4430 = \text{₡}155050,00$$

Para alambre negro (4,2% del peso de varillas):

$$A = 13 \text{ kg} \times 660 = \text{₡}8580,00$$

Para concreto f'c 245 premezclado (incluye 5% de desperdicio):

$$A = 7,19 \text{ m}^3 \times 78000 = \text{₡}560605,50$$

Obtenidos los materiales se calcula el costo de la mano de obra. Donde se los rendimientos se obtienen de tablas donde representan la cantidad de trabajo realizado en horas hombre (HH) para una definida subactividad. Las subactividades consideradas para realizar el cálculo de los costos por cimentación son:

CUADRO 7. Rendimientos por subactividad		
Subactividad	Unidad	Rendimiento HH
Confección de armadura	kg	0,03917
Colocación de armadura	kg	0,07235
Colocación de concreto	m ³	6,40000

Fuente: Elaboración propia, datos extraídos de (Contreras, 2020) y (Lemus, 1985).

Existen más subactividades como la excavación, colado para sello de concreto pobre, encofrado y desencofrado. Sin embargo, como se debe de hacer las mismas cantidades ya sea para las cimentaciones en donde se considera y no la ISE para ambos suelos, se omiten al no haber una influencia en la variación de los costos de la cimentación. Importante hay que aclarar que esto se aplica solo para este trabajo, en un presupuesto real se deben de tomar en cuenta todas. Definidos los rendimientos por subactividad se calculan los salarios en función de la ocupación del o los trabajadores que están involucrados en cada subactividad.

Los valores son obtenidos del Ministerio de Trabajo y Seguridad Social (MTSS), donde se toman los salarios mínimos por ley para un Operario de la construcción de ₡11761,76 por jornada laboral (8 horas al día) lo cual viene siendo alrededor de ₡1470,22 por hora. También se toma el salario para un ayudante de la construcción de ₡11549,15 por jornada laboral (₡1443,64 por hora) y el del peón de la construcción es de ₡10620,62 (₡1327,58 por hora). Al salario de los trabajadores se les debe considerar un 37% del aspecto de carga sociales según (Caja Costarricense de Seguro Social, 2020), este valor puede variar dependiendo la información presentada por el patrono, sin embargo, se trabajó con este valor como referencia. El costo de mano de obra por subactividad es el siguiente (solo para la cimentación de 3,6 m de lado):

Para confección de armadura (sin incluir cargas sociales):

$$B = 307,48 \text{ kg} \times 0,039 \times 1327,58 = \text{₡}15920,05$$

Para colocación de armadura (sin incluir cargas sociales):

$$B = 307,48 \text{ kg} \times 0,07 \times 1398,90 = \text{₡}31120,41$$

Para colocación de concreto (sin incluir cargas sociales):

$$B = 7,19 \text{ m}^3 \times 6,400 \times 1345,410 = \text{₡}61886,71$$

Para los costos de HH de las subactividades de colocación de armadura y colado de concreto se utiliza un promedio de los salarios de los integrantes de la cuadrilla que realiza el trabajo. Obtenidos el costo del total de los materiales, el costo de la mano de obra y sus cargas sociales, al sumarse todos se obtienen los costos directos (CD) que se representan en la siguiente ecuación:

$$CD = \sum A, B \quad (\text{ec.64})$$

El total del costo directo es de ₡873465,72, el de los costos indirectos es de ₡61142,60 (7% de los CD). Seguidamente, se suman los CD y los costos indirectos (CI) para de este total determinar el rubro de los imprevistos (5%) y las utilidades (10%), con lo cual da un monto de ₡46730,42 para los imprevistos y ₡93460,83 para las utilidades. Una vez obtenidos estos valores se suman para obtener el costo total final de la cimentación BIB_3 (la de 3,6 m de lado).

$$\text{Costo total final} = \text{₡}1074799,57$$

Para la cimentación de 1,9 m se realizan los mismos pasos y se calculó un costo total final de ₡287948,32.

Modelación sin ISE

Para la modelación sin considerar la interacción suelo-estructura (método rígido convencional) se utilizarán las mismas dimensiones de L y B de 3,7 m, el espesor de 50 cm y la dimensión de la columna de 50x50 cm.

Modelación en SAP 2000

Con respecto a la modelación en SAP 2000, las características del concreto, sección de área y mallado de elementos finitos es la misma. Donde existe variación es que no se utiliza resortes para simular el suelo y las solicitaciones últimas no se aplican directamente en la zona donde se ubica la columna. La modelación de las solicitaciones últimas se introduce a manera de sobrepresión (ver figura 16) en la parte inferior de la cimentación. Se colocan restricciones (empotradas) en la zona de la

columna para evitar el desplazamiento debido a la sobrepresión.

La sobrepresión se calcula a partir de la ecuación 25. Hay que aclarar que al no poderse introducir en SAP 2000 los cuatros valores diferentes de sobrepresión obtenidos por la ecuación 25, se debe simplificar el cálculo a solo dos sobrepresiones. Esto se lleva acabo calculado una dirección a la vez ya sea en “x” o “y”, por tanto, la ecuación 25 se simplifica a:

$$q_{act} = \frac{P}{A_{req}} \cdot \left(1 \pm \frac{6e_{b,L}}{B,L} \right) \text{ (ec.65)}$$

Donde:

$e_{b,L}$ = excentricidad ya sea en la dirección “y” o “x”.

B,L = Longitud en la dirección “y” o “x” respectivamente.

Con la ecuación 65 se obtiene un valor mínimo y uno máximo de presión representando una distribución trapezoidal o triangular (ver figura 16). Los valores de sobrepresión obtenidos para la cimentación de presentan en el cuadro 8. Obtenidos lo valores se introducen en el SAP 2000 usando la función de “Joint Patterns” como se representa en la figura 35. Los valores de sobrepresión para las demás cimentaciones se encuentran en la sección de apéndices (ver apéndice 4 y 5).

Cuadro 8. Valores de sobrepresión estáticas y dinámicas para la cimentación BIB_3			
$Q_{min\ en\ x}$ (kg/m ²)	$Q_{max\ en\ x}$ (kg/m ²)	$Q_{min\ en\ y}$ (kg/m ²)	$Q_{max\ en\ y}$ (kg/m ²)
Para suelo de q_{adm} 10 Tom/m ² (L=B=3,7m)			
Solicitaciones últimas estáticas			
8316,26	8743,99	8525,71	8534,53
Solicitaciones últimas dinámicas			
5039,48	5741,97	5211,57	5569,89
Para suelo de q_{adm} 30 Tom/m ² (L=B=1,9m)			
Solicitaciones últimas estáticas			
30768,92	33927,69	32315,73	32380,88
Solicitaciones últimas dinámicas			
17849,06	23036,86	19119,86	21766,05

Fuente: Elaboración propia.

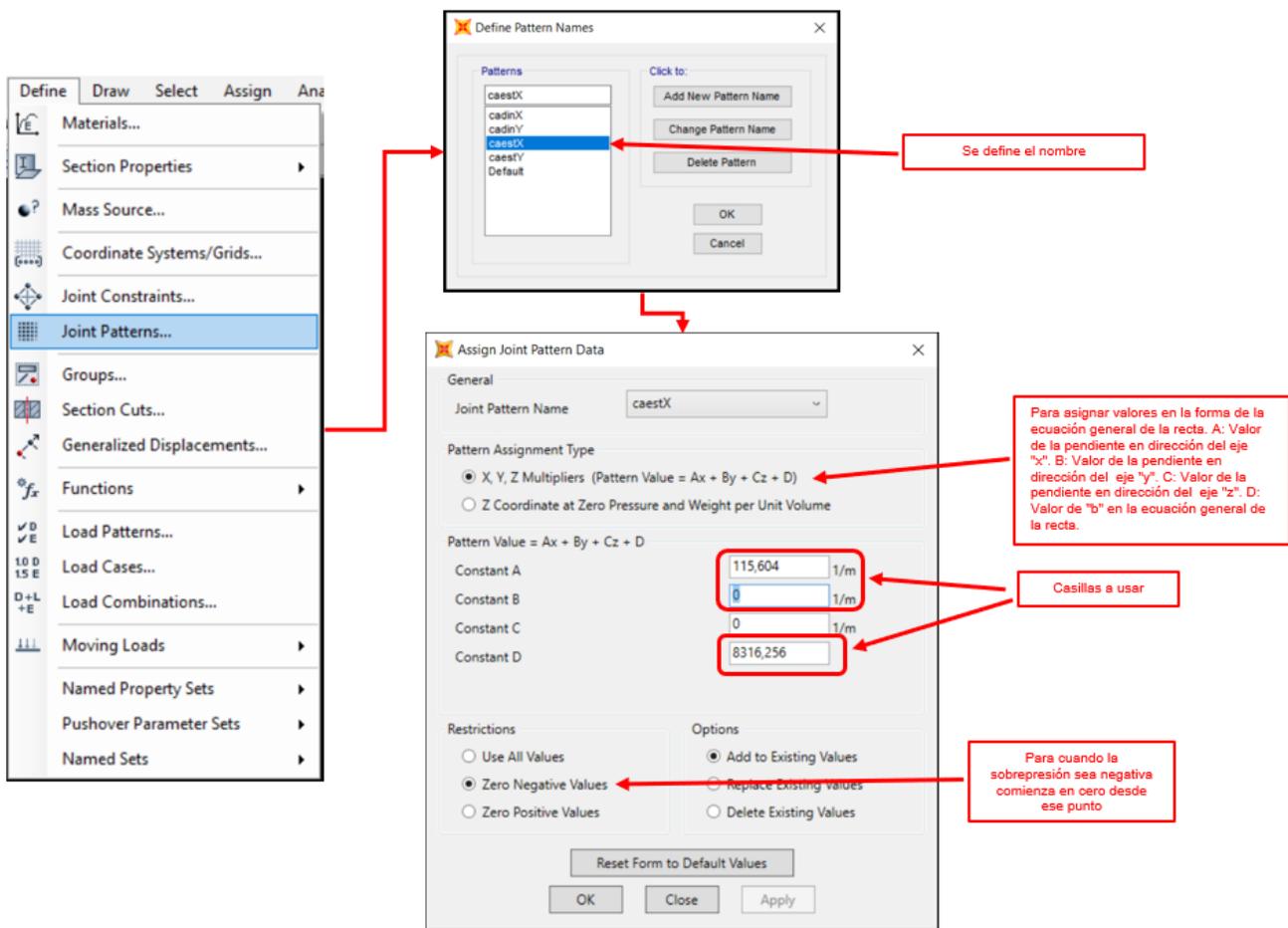


Figura 35. Definición del Joint Patterns para la cimentación BIB_3. Fuente: Elaboración propia.

Para introducir los datos del *Joint Patterns* se tiene que implementar la fórmula de la ecuación general de la recta (ecuación 66). Se crean los dos pares ordenados $(0, Q_{min})$ y (L, Q_{max}) y se despejan las variables de la pendiente "m" y "b". En la figura 36 se representa la aplicación de la sobrepresión en la cimentación.

$$y = mx + b \quad (\text{ec.66})$$

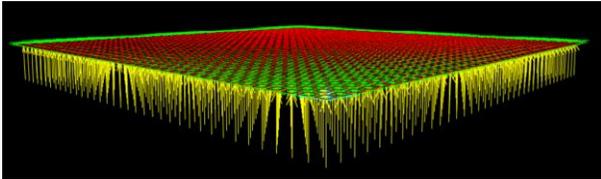


Figura 36. Colocación de la sobrepresión en la cimentación BIB_3. Fuente: Elaboración propia.

Una vez modelada la cimentación con sus respectivas cargas, se corre y se obtienen los esfuerzos internos de momento flector y cortante (ver cuadro 9) para posteriormente diseñarla a través de la teoría para diseño de concreto reforzado. En la figura 37 se muestran los diagramas de la distribución esfuerzos por momento flector en las direcciones de "x" e (izquierda) e "y" (derecha).

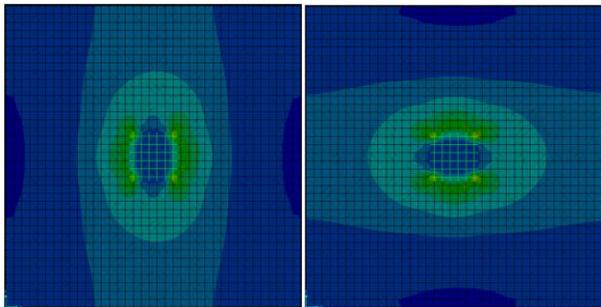


Figura 37. Distribución de esfuerzo por momento flector en "x" e "y" para la cimentación BIB_3. Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 9. Valores de los esfuerzos para la cimentación BIB_3 sin ISE				
Placa	Para (L=B=3,7m)		Para (L=B=1,9m)	
	M _u (kg-m)	V _u (kg)	M _u (kg-m)	V _u (kg)
BIB_3	16844,3 2	58863,6 6	13405,4 3	52782,1 7

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de costos

El procedimiento para determinar el costo unitario de la cimentación BIB_3 donde no se considera la ISE se realiza de igual forma que la realizada para la cimentación donde se considera la ISE. Al precio de los materiales se le agrega el de la varilla #4 de G-60.

CUADRO 10. Precio de materiales			
Material	Costo Unitario (₡)	Costo Unitario (\$)	Unidad
Varilla #4 G-60	2840,00	4,68	Unidad
Varilla #5 G-60	4430,00	7,34	Unidad
Alambre negro	660,00	1,09	kg
Concreto f'c 245	78000,00	144,05	m ³

Fuente: Elaboración propia, datos extraídos de CONSTRUPLAZA y Grupo Orosi.

Se inicia el cálculo del costo de los materiales (solo para la cimentación de 3,6 m de lados) usando la ecuación 62.

Para varilla #4 G-60:

$$A = 4 \text{ und } x 2840 = \text{₡}11360,00$$

Para varilla #5 G-60 (incluye 10% de desperdicio):

$$A = 31 \text{ und } x 4430 = \text{₡}137330,00$$

Para alambre negro (4,2% del peso de varillas):

$$A = 13 \text{ und } x 660 = \text{₡}8580$$

Para concreto f'c 245 premezclado (incluye 5% de desperdicio):

$$A = 7,19 \text{ m}^3 x 78000 = \text{₡}560605,50$$

Obtenidos los materiales se calcula el costo de la mano de obra. Donde se los rendimientos son los presentados en el cuadro 7. El costo de mano de obra por subactividad es el siguiente (solo para la cimentación de 3,6 m de lado):

Para confección de armadura (sin incluir cargas sociales):

$$B = 296,77 \text{ kg} \times 0,039 \times 1327,58 = \text{¢}15365,35$$

Para colocación de armadura (sin incluir cargas sociales):

$$B = 296,77 \text{ kg} \times 0,07 \times 1398,90 = \text{¢}30036,08$$

Para colocación de concreto (sin incluir cargas sociales):

$$B = 7,19 \text{ m}^3 \times 6,400 \times 1345,410 = \text{¢}61886,71$$

El total del costo directo es de ¢864860,25, el de los costos indirectos es de ¢60540,22 (7% de los CD). Seguidamente, se suman los CD y los costos indirectos (CI) para de este total determinar el rubro de los imprevistos (5%) y las utilidades (10%), con lo cual da un monto de ¢46270,02 para los imprevistos y ¢92540,05 para las utilidades. Una vez obtenidos estos valores se suman para obtener el costo total final de la cimentación BIB_3 (la de 3,6 m de lado).

$$\text{Costo total final} = \text{¢}1064210,53$$

Para la cimentación de 1,9 m se realizan los mismos pasos y se calculó un costo total final de ¢273111,91.

Resultados

Reacciones

Antes de diseñar las cimentaciones es necesario obtener las reacciones en las bases de las columnas, debido a que es donde se construirá la cimentación (placa aislada), en el siguiente cuadro se muestran las reacciones obtenidas para cada cimentación.

CUADRO 11. Reacciones obtenidas para la condición de servicio estática.			
Cimentación	Axial (kg) CM+CV	M_x (kg·m): CM+CV	M_y (kg·m): CM+CV
CL_1	90561,95	-85,87	-6916,39
QUIM_3	66466,38	-507,49	-2844,15
QUIM_4	59402,69	-750,29	2735,54
COMPU_1	150459,73	578,71	7294,13
COMPU_2	294841,8	1145,6	-469,6
COMPU_3	280931	-2250,84	-3355,89
COMPU_4	296514,39	6546,1	-5495,06
BIB_1	26368,26	551,48	492,26
BIB_2	91935,97	7360,03	-30,45
BIB_3	85064,63	1144,03	-25,25
BIB_4	83730,18	-6560,82	117,41
BIB_5	26257,74	-540,22	-407,1
LIMO_1	141556,01	-6086,21	104,99
LIMO_2	143575,11	-5383,27	409,33
LIMO_3	145223,01	-7222,13	243,15
LIMO_4	146403,07	-7202,63	-171,86
LIMO_5	55865,01	-766,6	-970,24
LIMO_6	184087,44	-248,65	6832,45
LIMO_7	132027,9	-356,49	-7633,49
VI_1	18645,19	-65,64	-491,18
VI_2	18834,34	-163,28	281,23

(Continuación de Cuadro 11)

VI_3	22698,16	-1075,78	648,48
VI_4	14822,9	-434,06	429,29
VI_5	7954,65	262,38	-354,23
VI_6	15174,23	235,22	240,35
VI_7	12010,44	363,89	636,14
VI_8	6718,87	226,75	279,08
COME_1	46889,27	920,74	833,34
COME_2	74185,97	-28,69	1637,81
COME_3	71244,69	-848,73	1174,45
COME_4	46117,32	-328,05	548,62
COME_5	48634,53	4379,53	-2933,67
COME_6	74011,64	-1636,37	557,76
COME_7	72584,86	3198,78	2308,48
COME_8	48888,12	-4650,47	3659,76
COME_9	47111,33	4420,51	3974,76
COME_10	71342,06	-265,18	489,79
COME_11	55375,13	-1908,54	2540,03
COME_12	68908,45	2673,52	-1368,24
COME_13	46476,11	-4766,19	-2886,86
COME_14	12420,69	131,89	-5167,33
COME_15	12502,46	106,91	-4016,63
COME_16	12620,96	-57,35	-4180,8
COME_17	12359,28	104,89	-3572,88
COME_18	11344,43	-236,17	-403,63

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 12. Reacciones obtenidas para la condición de servicio dinámica.

Cimentación	EJE DEL SISMO	Axial (kg) 1,1CM+0,5CV+CS	M_x (kg·m): 1,1CM+0,5CV+CS	M_y (kg·m): 1,1CM+0,5CV+CS
CL_1	X	91710,91	-541,87	-7687,64
	Y	90519,47	1408,58	-6408,73
QUIM_3	X	60588,15	655,11	-12222,86
	Y	59943,60	2067,47	-3329,14
QUIM_4	X	58069,58	-1720,72	-5358,05
	Y	46507,03	1910,93	2203,62
COMPU_1	X	194898,80	2227,68	-1526,74
	Y	176864,80	8061,02	6632,02
COMPU_2	X	283930,71	3139,40	-9676,13
	Y	268926,70	6974,31	-851,55
COMPU_3	X	278856,76	-1041,56	-12357,97
	Y	294077,80	2938,02	-3574,15
COMPU_4	X	296926,00	6151,42	-16186,54
	Y	300376,02	9172,68	-6312,37
BIB_1	X	26965,54	640,25	-834,77
	Y	31572,86	2360,14	583,43
BIB_2	X	88832,68	6829,72	-1598,66
	Y	89706,50	8628,40	41,63
BIB_3	X	69705,20	743,50	-1512,84
	Y	67372,70	2928,16	-17,60
BIB_4	X	79475,43	-5943,53	-1399,31
	Y	78534,77	-3953,16	27,46
BIB_5	X	27064,38	-462,71	-1754,20
	Y	21288,99	1636,68	-518,02
LIMO_1	X	143271,46	-6142,28	-2861,38
	Y	141642,85	-5081,55	-107,77
LIMO_2	X	144577,87	-5319,44	-2563,43
	Y	140270,44	-4033,56	34,96
LIMO_3	X	147644,06	-7295,70	-2744,46
	Y	142161,32	-5473,36	139,66
LIMO_4	X	148641,60	-7256,23	-3109,11
	Y	143190,49	-5164,23	-516,24

(Continuación del Cuadro 12)

LIMO_5	X	63044,63	-938,38	-3501,51
	Y	49114,51	2071,62	-1183,83
LIMO_6	X	177644,79	-189,49	6210,37
	Y	177694,63	1316,26	6556,24
LIMO_7	X	132581,69	-238,01	-7811,24
	Y	141233,48	1784,33	-7561,35
VI_1	X	18068,04	-338,68	-7604,30
	Y	18429,66	159,56	-612,87
VI_2	X	21544,79	-311,54	-7397,49
	Y	11586,40	457,87	212,38
VI_3	X	11807,64	-991,82	-7118,73
	Y	22126,61	-442,76	588,31
VI_4	X	21418,13	-454,83	-7516,13
	Y	-4325,85	1027,08	308,44
VI_5	X	4162,83	152,90	-7410,25
	Y	14946,63	641,91	-335,47
VI_6	X	13637,29	27,34	-7981,85
	Y	24427,10	996,79	325,86
VI_7	X	7223,55	271,47	-7472,14
	Y	31426,15	1399,43	792,79
VI_8	X	9868,74	278,06	-8306,25
	Y	29979,82	1622,53	304,85
COME_1	X	43865,26	598,68	511,13
	Y	45477,71	167,72	236,18
COME_2	X	67958,90	-202,60	1329,96
	Y	69597,30	-585,23	1201,62
COME_3	X	65759,13	-888,57	1076,30
	Y	67454,13	-1272,97	1245,66
COME_4	X	43208,16	-362,14	548,34
	Y	42800,86	-795,20	849,71
COME_5	X	45779,69	4741,89	-5192,20
	Y	46523,94	6841,93	-6768,14
COME_6	X	68540,47	-637,50	-1569,05
	Y	68832,14	1637,64	-1733,22
COME_7	X	67277,35	3694,23	837,71
	Y	67311,29	6183,27	3726,32
COME_8	X	45916,53	-3505,09	2413,15
	Y	45741,20	-1440,68	6800,81
COME_9	X	44747,80	4399,84	834,13
	Y	45277,44	5297,45	-530,55
COME_10	X	65933,19	138,19	-1894,18

(Continuación del Cuadro 12)

	Y	66782,29	1335,24	-1792,43
COME_11	X	53359,75	-1372,81	51,72
	Y	52810,10	-212,29	2025,34
COME_12	X	63675,03	2812,19	-2646,06
	Y	64531,14	4012,31	373,15
COME_13	X	44133,19	-3997,05	-3479,18
	Y	43500,42	-3099,52	983,99
COME_14	X	9596,45	-44,27	-8372,56
	Y	21212,38	733,18	-9367,86
COME_15	X	12231,78	-103,56	-7649,72
	Y	12301,53	747,01	-6654,98
COME_16	X	12301,59	-252,41	-7145,33
	Y	12353,80	610,17	-4258,18
COME_17	X	12069,07	-104,11	-6054,21
	Y	12093,37	745,73	-1140,91
COME_18	X	14153,28	-408,43	-2088,67
	Y	2476,84	360,19	3366,54

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 13. Reacciones obtenidas para las solicitudes últimas estáticas.			
Cimentación	Axial (kg) SU. Est.	Mx (kg·m): SU. Est.	My (kg·m): SU. Est.
CL_1	114487,170	-107,270	-8922,090
QUIM_3	83414,980	-653,100	-3656,880
QUIM_4	74292,310	950,130	3497,730
COMPU_1	190390,240	751,630	9433,400
COMPU_2	376749,850	1462,720	-598,090
COMPU_3	358303,430	-2877,350	-4385,210
COMPU_4	375083,270	8428,260	-7122,280
BIB_1	33062,760	726,940	642,410
BIB_2	118611,610	9688,950	-37,940
BIB_3	116777,380	1805,500	-37,240
BIB_4	108802,060	-8736,710	149,440
BIB_5	32910,390	-711,600	-555,160
LIMO_1	178558,430	-7837,950	135,850
LIMO_2	181524,400	-6990,870	538,920
LIMO_3	182978,860	-9190,460	310,100
LIMO_4	184460,740	-9164,680	-218,890
LIMO_5	70595,150	-971,790	-1240,940
LIMO_6	237616,050	-331,860	8771,360
LIMO_7	168000,960	-447,060	-9786,710
VI_1	23227,200	-90,130	-733,040
VI_2	23612,300	-220,490	368,840
VI_3	28496,680	-1423,300	815,040
VI_4	18827,840	-545,810	563,360
VI_5	9965,860	338,090	-563,480
VI_6	19062,540	311,200	318,730
VI_7	15010,160	463,150	795,230
VI_8	8906,220	285,780	372,740
COME_1	61022,260	1282,700	1077,340
COME_2	97575,020	-154,130	2119,630
COME_3	93498,590	-1129,570	1495,380
COME_4	59990,110	-490,870	688,240
COME_5	63528,580	5793,460	-3939,820
COME_6	97464,550	-2164,830	715,140
COME_7	95396,480	4266,570	3055,960
COME_8	63871,700	-6161,800	4881,550
COME_9	61319,890	5850,910	5279,340
COME_10	93890,510	-351,450	652,560

(Continuación del Cuadro 13)

COME_11	72764,640	-2523,850	3356,980
COME_12	90722,070	3544,240	-1839,690
COME_13	60462,150	-6311,370	-3917,800
COME_14	15841,660	164,250	-6791,250
COME_15	16092,530	143,110	-5319,890
COME_16	16257,960	-77,210	-5539,480
COME_17	15901,430	139,630	-4731,310
COME_18	14395,740	-304,490	-785,030

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 14. Reacciones obtenidas para las solicitudes últimas dinámicas.			
Cimentación	Axial (kg) SU. Dinm.	Mx (kg·m): SU. Dinm.	My (kg·m): SU. Dinm.
CL_1	88023,240	-1717,180	-7499,330
QUIM_3	74562,650	-3375,720	-12281,060
QUIM_4	73385,530	-3671,960	10765,970
COMPU_1	196440,720	8542,280	15364,090
COMPU_2	300827,440	7531,410	-9773,020
COMPU_3	283163,160	-7621,290	-12360,910
COMPU_4	288060,800	8973,950	-16295,850
BIB_1	30459,570	2380,120	1873,320
BIB_2	86186,490	8373,230	-1619,220
BIB_3	73799,080	2965,260	-1512,520
BIB_4	77589,990	-7676,040	1653,850
BIB_5	31221,710	-2627,070	-1757,330
LIMO_1	137894,320	-6541,870	3121,270
LIMO_2	142016,520	-6072,260	3409,390
LIMO_3	145312,990	-8589,180	3244,630
LIMO_4	146571,200	-8856,750	-3205,950
LIMO_5	62847,120	-3622,550	-3532,040
LIMO_6	170643,730	-1764,700	6863,970
LIMO_7	136338,690	-2532,940	-7539,170
VI_1	19807,010	-401,240	-7594,060
VI_2	26703,620	-788,940	7926,930
VI_3	33659,990	-1491,700	8462,270
VI_4	36395,750	-1893,030	8327,940
VI_5	15816,380	661,960	-7415,070
VI_6	24307,320	1045,050	8443,540
VI_7	32427,780	1411,260	8801,670
VI_8	30469,450	1624,990	8813,840

(Continuación del Cuadro 14)

COME_1	43901,720	1344,870	1420,020
COME_2	67202,350	-616,380	1948,240
COME_3	65073,290	-1280,890	1226,240
COME_4	43148,620	-835,080	829,100
COME_5	44748,080	6909,640	-7452,170
COME_6	66243,940	-4835,620	3434,800
COME_7	64960,010	6322,120	4028,500
COME_8	44416,600	-7108,380	6942,410
COME_9	43551,600	5251,740	8443,200
COME_10	64287,100	-1923,870	3431,060
COME_11	51791,050	-3332,350	4612,710
COME_12	62112,620	4033,250	-3177,480
COME_13	42950,790	-5553,270	-6181,940
COME_14	21506,770	781,490	-10255,540
COME_15	11846,640	803,200	-8407,360
COME_16	11888,180	-769,960	-7134,530
COME_17	11632,970	801,860	-6568,090
COME_18	20518,630	441,790	-4880,140

Fuente: Elaboración propia.

Las reacciones presentadas en los cuadros 11 y 12 son utilizadas para el cálculo de las dimensiones (L y B) para las cimentaciones y las reacciones de los cuadros 13 y 14 para el diseño de estas.

Dimensiones

Las dimensiones obtenidas para las cimentaciones de los suelos con capacidad admisible de 10 Ton/m² y 30 Ton/m² se presentan en el próximo cuadro.

CUADRO 15. Dimensiones para las cimentaciones				
Cimentación	Suelo con capacidad admisible de 10Ton/m²		Suelo con capacidad admisible de 30Ton/m²	
	L=B(m)_CONV	L=B(m)_ISE	L=B(m)_CONV	L=B(m)_ISE
CL_1	3,600	3,600	2,000	2,000
QUIM_3	3,200	3,200	1,600	1,600
QUIM_4	3,200	3,200	1,600	1,600
COMPU_1	4,700	4,700	2,500	2,500
COMPU_2	6,700	6,700	3,500	3,500
COMPU_3	6,700	6,700	3,500	3,500
COMPU_4	6,700	6,700	3,500	3,500
BIB_1	2,100	2,100	1,100	1,100
BIB_2	3,700	3,700	1,900	1,900
BIB_3	3,700	3,700	1,900	1,900

(Continuación del Cuadro 15)

BIB_4	3,700	3,700	1,900	1,900
BIB_5	2,100	2,100	1,100	1,100
LIMO_1	4,700	4,700	2,300	2,300
LIMO_2	4,700	4,700	2,500	2,500
LIMO_3	4,700	4,700	2,500	2,500
LIMO_4	4,700	4,700	2,500	2,500
LIMO_5	2,900	2,900	1,500	1,500
LIMO_6	5,300	5,300	2,700	2,700
LIMO_7	4,700	4,700	2,300	2,300
VI_1	1,800	1,800	1,800	1,800
VI_2	1,800	1,800	1,600	1,600
VI_3	2,000	2,000	2,000	2,000
VI_4	1,800	1,800	1,800	1,800
VI_5	2,400	2,400	2,400	2,400
VI_6	2,000	2,000	2,000	2,000
VI_7	2,200	2,200	2,200	2,200
VI_8	2,200	2,200	2,200	2,200
COME_1	2,700	2,700	1,500	1,500
COME_2	3,300	3,300	1,700	1,700
COME_3	3,300	3,300	1,700	1,700
COME_4	2,700	2,700	1,500	1,500
COME_5	2,700	2,700	1,500	1,500
COME_6	3,300	3,300	1,700	1,700
COME_7	3,300	3,300	1,700	1,700
COME_8	2,700	2,700	1,500	1,500
COME_9	2,700	2,700	1,500	1,500
COME_10	3,300	3,300	1,700	1,700
COME_11	2,900	2,900	1,700	1,700
COME_12	3,300	3,300	1,700	1,700
COME_13	2,700	2,700	1,500	1,500
COME_14	2,300	2,300	2,300	2,300
COME_15	2,100	2,100	2,100	2,100
COME_16	2,100	2,100	2,100	2,100
COME_17	1,900	1,900	1,900	1,900
COME_18	1,900	1,900	1,900	1,900

Fuente: Elaboración propia.

Cortantes y momentos

A partir de los modelos realizados para las cimentaciones, tanto por el método que considera y no la interacción suelo-estructura. Se obtienen los esfuerzos máximos de cortante y momento inferior

y superior para cada una de las cimentaciones, debido a que son necesarios para el diseño del refuerzo de acero correspondiente de cada cimentación. Los esfuerzos de las cimentaciones se muestran en el cuadro siguiente. Así como los porcentajes de diferencias entre los esfuerzos obtenidos a través de cada una de las dos metodologías de diseño.

CUADRO 16. Cortantes y momentos de las cimentaciones en el suelo de 10 Ton/m² de capacidad admisible						
Cimentación	Método Rígido Convencional			Método de Interacción Suelo-Estructura		
	Vu (kg/m)	Mu_Inf (kg-m/m)	Mu_Sup (kg-m/m)	Vu (kg/m)	Mu_Inf (kg-m/m)	Mu_Sup (kg-m/m)
CL_1	60645,97	19936,68	87,19	72299,15	24965,88	660,26
QUIM_3	41175,78	11475,40	51,42	40289,85	13854,18	415,83
QUIM_4	37912,56	10834,12	45,36	37243,61	13355,17	412,16
COMPU_1	114016,74	34153,93	83,93	73382,51	34270,64	1648,89
COMPU_2	180952,90	70205,86	284,13	123497,31	60844,84	5344,44
COMPU_3	163021,57	65614,24	262,93	119934,20	58171,00	5086,28
COMPU_4	174621,29	71597,62	283,76	128796,39	61219,06	5343,13
BIB_1	12575,12	3044,56	8,52	16391,23	4659,35	132,49
BIB_2	60220,45	19792,82	64,75	54957,99	22100,40	923,60
BIB_3	58863,66	16844,32	62,59	49471,85	20664,23	755,74
BIB_4	52547,20	17377,51	64,52	52823,73	20251,59	843,82
BIB_5	13287,01	3213,42	9,99	16817,85	4716,18	142,96
LIMO_1	94838,04	30140,47	134,62	79809,60	35170,37	1551,82
LIMO_2	98255,90	30549,94	136,91	80846,55	35603,92	1564,09
LIMO_3	104772,22	31683,05	141,00	83117,80	36220,38	1605,19
LIMO_4	104433,33	32042,69	142,65	83644,86	36498,22	1617,01
LIMO_5	30050,56	8490,41	18,70	31664,61	11772,29	276,15
LIMO_6	149216,80	43131,23	203,01	110380,61	47413,45	2448,44
LIMO_7	90500,11	28158,30	124,67	81441,15	34156,24	1350,09
VI_1	14464,05	3937,84	1142,00	36502,41	6028,92	1721,93
VI_2	18316,55	4977,75	668,51	39377,20	6989,73	1251,68
VI_3	22152,69	6125,54	348,56	43084,36	8471,84	689,78
VI_4	24429,26	6389,65	159,78	43603,52	8337,04	658,83
VI_5	10200,00	2860,51	2860,51	34401,47	6064,25	1833,76
VI_6	16279,42	4763,67	1189,15	40904,84	7298,25	1635,08
VI_7	20365,57	5965,41	639,18	43960,81	8824,80	765,27
VI_8	20173,48	5662,79	857,53	43727,21	8584,61	1043,89
COME_1	16948,00	7076,76	9,86	26507,59	9862,04	220,94
COME_2	52476,21	13574,90	44,19	42493,94	17057,57	445,92

(Continuación del Cuadro 16)

COME_3	45362,92	12564,69	41,15	40631,85	16269,06	450,04
COME_4	23808,51	6714,42	7,11	25186,79	9563,21	194,43
COME_5	27079,20	8918,29	30,78	37800,23	11142,64	359,89
COME_6	51656,84	13567,46	44,15	42022,21	16859,78	494,17
COME_7	45062,80	13831,16	46,12	45016,18	17121,76	532,90
COME_8	27312,86	9092,27	37,09	38255,44	11392,62	364,65
COME_9	25525,40	8559,77	47,42	37627,07	11045,05	350,34
COME_10	44515,71	12372,05	40,95	39443,76	16092,74	433,58
COME_11	35962,68	9642,85	25,72	33583,28	12687,24	320,59
COME_12	42387,75	12670,67	42,04	41322,14	16004,61	495,74
COME_13	34016,87	8557,91	33,25	35783,31	10677,73	355,54
COME_14	14206,05	3943,94	2132,47	34270,61	6564,23	1783,25
COME_15	10075,48	2254,33	1936,17	27285,06	4578,33	2111,19
COME_16	8792,35	2066,38	1246,41	23504,57	4082,66	1630,94
COME_17	8770,26	1993,16	760,08	21971,01	3670,95	1491,71
COME_18	10393,84	2597,78	329,18	18385,31	3859,19	73,21

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 17. Cortantes y momentos de las cimentaciones en el suelo de 30 Ton/m² de capacidad admisible						
Cimentación	Método Rígido Convencional			Método de Interacción Suelo-Estructura		
	Vu (kg/m)	Mu_Inf (kg-m/m)	Mu_Sup (kg-m/m)	Vu (kg/m)	Mu_Inf (kg-m/m)	Mu_Sup (kg-m/m)
CL_1	60143,75	17980,82	27,24	70826,14	19563,67	353,63
QUIM_3	40289,37	8090,98	36,00	40745,40	8740,58	282,87
QUIM_4	37722,58	7660,92	26,35	37246,52	8423,75	282,80
COMPU_1	66077,16	26887,49	33,03	69188,76	25894,93	828,64
COMPU_2	160260,79	63319,17	62,93	116503,47	52375,23	2664,69
COMPU_3	150422,09	60639,55	67,97	113574,78	50203,35	2554,01
COMPU_4	160084,07	64780,68	80,40	122149,43	52919,39	2760,52
BIB_1	12445,37	1838,72	5,72	14697,78	2609,69	184,31
BIB_2	53154,30	15922,19	9,86	55468,34	15709,11	643,52
BIB_3	52782,17	13405,43	7,16	46201,82	14575,17	352,00
BIB_4	45049,21	14452,57	14,19	50770,67	14386,16	582,45
BIB_5	12210,06	1928,05	6,01	15030,61	2694,31	207,93
LIMO_1	89740,17	26430,55	13,78	78124,36	25940,46	757,12
LIMO_2	97466,69	28100,63	17,80	78986,42	27341,84	815,60
LIMO_3	97594,88	29014,37	31,96	81864,77	28012,22	894,49
LIMO_4	97419,72	29243,03	33,33	82381,63	28227,12	897,94
LIMO_5	23095,27	6031,88	4,40	30054,91	7570,17	246,25
LIMO_6	136855,22	39455,48	61,16	106095,45	38520,25	962,66
LIMO_7	90238,97	25462,08	13,39	78057,18	26024,01	479,83

(Continuación del Cuadro 17)

VI_1	14464,05	3937,84	1142,71	36472,27	6006,03	1713,58
VI_2	18448,03	4882,50	580,13	39716,02	6583,62	1450,04
VI_3	22152,69	6125,54	348,56	43065,11	8422,30	730,57
VI_4	24429,26	6389,65	159,78	43596,35	8295,31	686,44
VI_5	10200,00	2860,51	2860,51	34411,03	6019,04	1869,02
VI_6	16279,42	4763,67	1189,15	40894,72	7260,79	1664,49
VI_7	20365,57	5965,41	639,18	43952,48	8761,69	818,54
VI_8	20173,48	5662,79	857,53	43712,12	8523,99	1093,90
COME_1	19527,98	5198,00	3,48	24147,53	6547,29	138,76
COME_2	35806,47	10049,00	6,14	39253,06	11644,51	183,78
COME_3	36092,45	9441,05	5,69	37411,35	11105,72	224,86
COME_4	19456,57	4948,35	3,21	22791,38	6339,23	94,68
COME_5	28303,26	6615,60	27,64	37505,05	7553,73	537,11
COME_6	36152,51	10050,31	6,14	38861,99	11405,17	320,02
COME_7	37461,22	10418,81	6,67	42005,69	11748,33	373,75
COME_8	28391,34	6743,75	24,76	36882,04	7764,99	563,32
COME_9	27703,20	6433,06	38,38	36412,40	7555,30	658,89
COME_10	36430,12	9246,76	5,45	36187,74	10903,18	221,47
COME_11	29077,55	7757,02	4,99	32962,64	9107,70	252,98
COME_12	38030,81	9719,40	6,16	38586,85	10954,50	324,11
COME_13	33574,18	6478,08	17,65	34363,31	7331,35	387,63
COME_14	14206,05	3943,94	2132,47	34271,38	6512,23	1822,25
COME_15	10075,48	2254,33	1936,17	27281,72	4554,03	2124,78
COME_16	8792,35	2066,38	1246,41	23499,20	4059,27	1645,22
COME_17	8770,26	1993,16	760,08	21964,82	3652,49	1500,49
COME_18	10393,84	2597,78	329,18	18374,20	3838,39	88,08

Fuente: Elaboración propia.

Diseño

Realizado el cálculo para el diseño del acero requerido a flexión y la verificación de cortante de cada una de las cimentaciones. Se realiza un

resumen de las distribuciones de acero para la malla superior e inferior, así como, el acero en forma de bastones que serán colocados solamente en le mallado inferior. También se coloca el espesor que posee cada una de las cimentaciones. Lo datos son presentados en los siguientes cuadros.

CUADRO 18. Resumen del diseño de acero y espesor para cimentaciones modeladas con el método rígido convencional en el suelo de 10 Ton/m² de capacidad admisible								
Cimentación	Espesor	Malla inferior		Bastones			Malla superior	
	t (cm)	Sep (cm)	# Vari a usar	Sep (cm)	# Vari a usar	Long (cm)	Sep (cm)	# Vari a usar
CL_1	50	35	5	40	5	120	35	5
QUIM_3	50	35	5	-	-	-	35	5

(Continuación del cuadro 18)

QUIM_4	50	35	5	-	-	-	35	5
COMPU_1	60	20	6	-	-	-	35	6
COMPU_2	60	15	7	40	6	290	35	6
COMPU_3	60	15	7	40	6	310	35	6
COMPU_4	60	15	7	40	7	290	35	6
BIB_1	50	35	5	-	-	-	35	5
BIB_2	50	35	5	40	5	150	35	5
BIB_3	50	35	5	35	4	160	35	5
BIB_4	50	35	5	40	4	150	35	5
BIB_5	50	35	5	-	-	-	35	5
LIMO_1	60	20	6	-	-	-	40	6
LIMO_2	60	25	6	100	5	270	40	6
LIMO_3	60	25	6	100	6	250	40	6
LIMO_4	60	25	6	100	6	250	40	6
LIMO_5	60	25	5	-	-	-	25	5
LIMO_6	60	15	6	-	-	-	40	6
LIMO_7	60	30	6	100	6	250	40	6
VI_1	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_2	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_3	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_4	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_5	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_6	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_7	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_8	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_1	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_2	50	30	5	-	-	-	35	5
COME_3	50	30	5	-	-	-	35	5
COME_4	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_5	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_6	50	30	5	-	-	-	35	5
COME_7	50	30	5	-	-	-	35	5
COME_8	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_9	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_10	50	30	5	-	-	-	35	5
COME_11	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_12	50	30	5	-	-	-	35	5
COME_13	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_14	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_15	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_16	50	35	5	-	-	-	35	5

(Continuación del cuadro 18)

COME_17	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_18	50	35	5	-	-	-	35	5

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 19. Resumen del diseño de acero y espesor para cimentaciones modeladas con el método de interacción suelo-estructura en el suelo de 10 Ton/m² de capacidad admisible								
Cimentación	Espesor	Malla inferior		Bastones			Malla superior	
	t (cm)	Sep (cm)	# Vari a usar	Sep (cm)	# Vari a usar	Long (cm)	Sep (cm)	# Vari a usar
CL_1	50	30	5	25	5	120	35	5
QUIM_3	50	35	5	100	4	200	35	5
QUIM_4	50	35	5	-	-	-	35	5
COMPU_1	60	40	6	40	6	170	40	6
COMPU_2	60	20	6	15	6	170	40	6
COMPU_3	60	20	6	20	5	170	40	6
COMPU_4	60	15	6	15	6	170	40	6
BIB_1	50	35	5	-	-	-	35	5
BIB_2	50	35	5	30	5	150	35	5
BIB_3	50	35	5	35	5	160	35	5
BIB_4	50	35	5	20	4	150	35	5
BIB_5	50	35	5	-	-	-	35	5
LIMO_1	60	35	6	40	6	150	40	6
LIMO_2	60	35	6	40	6	150	40	6
LIMO_3	60	35	6	40	6	150	40	6
LIMO_4	60	35	6	40	6	150	40	6
LIMO_5	60	25	5	-	-	-	25	5
LIMO_6	60	20	6	40	6	150	40	6
LIMO_7	60	35	6	40	6	150	40	6
VI_1	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_2	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_3	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_4	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_5	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_6	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_7	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_8	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_1	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_2	50	35	5	40	4	130	35	5
COME_3	50	35	5	40	4	130	35	5
COME_4	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_5	50	35	5	-	-	-	35	5

(Continuación del cuadro 19)

COME_6	50	35	5	40	4	130	35	5
COME_7	50	35	5	40	4	130	35	5
COME_8	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_9	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_10	50	35	5	40	4	130	35	5
COME_11	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_12	50	35	5	40	4	130	35	5
COME_13	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_14	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_15	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_16	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_17	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_18	50	35	5	-	-	-	35	5

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 20. Resumen del diseño de acero y espesor para cimentaciones modeladas con el método rígido convencional en el suelo de 30 Ton/m² de capacidad admisible								
Cimentación	Espesor	Malla inferior		Bastones			Malla superior	
	t (cm)	Sep (cm)	# Vari a usar	Sep (cm)	# Vari a usar	Long (cm)	Sep (cm)	# Vari a usar
CL_1	50	35	5	25	4	120	35	5
QUIM_3	50	35	5	-	-	-	35	5
QUIM_4	50	35	5	-	-	-	35	5
COMPU_1	60	40	6	25	4	150	40	6
COMPU_2	60	20	7	15	5	170	40	6
COMPU_3	60	15	6	15	5	170	40	6
COMPU_4	60	20	7	20	6	170	40	6
BIB_1	50	35	5	-	-	-	35	5
BIB_2	50	30	5	40	3	130	35	5
BIB_3	50	35	5	-	-	-	35	5
BIB_4	50	30	5	-	-	-	35	5
BIB_5	50	35	5	-	-	-	35	5
LIMO_1	60	25	6	-	-	-	40	6
LIMO_2	60	25	6	-	-	-	40	6
LIMO_3	60	25	6	-	-	-	40	6
LIMO_4	60	25	6	-	-	-	40	6
LIMO_5	60	25	5	-	-	-	25	5
LIMO_6	60	15	6	-	-	-	40	6
LIMO_7	60	25	6	-	-	-	40	6
VI_1	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_2	50	35	5	-	-	-	35	5

(Continuación del cuadro 20)

VI_3	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_4	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_5	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_6	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_7	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_8	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_1	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_2	50	35	5	-	-	-	30	5
COME_3	50	35	5	-	-	-	30	5
COME_4	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_5	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_6	50	35	5	-	-	-	30	5
COME_7	50	35	5	-	-	-	30	5
COME_8	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_9	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_10	50	35	5	-	-	-	30	5
COME_11	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_12	50	35	5	-	-	-	30	5
COME_13	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_14	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_15	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_16	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_17	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_18	50	35	5	-	-	-	35	5

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 21. Resumen del diseño de acero y espesor para cimentaciones modeladas con el método de interacción suelo-estructura en el suelo de 30 Ton/m² de capacidad admisible								
Cimentación	Espesor	Malla inferior		Bastones			Malla superior	
	t (cm)	Sep (cm)	# Vari a usar	Sep (cm)	# Vari a usar	Long (cm)	Sep (cm)	# Vari a usar
CL_1	50	30	5	25	4	100	35	5
QUIM_3	50	35	5	-	-	-	35	5
QUIM_4	50	35	5	-	-	-	35	5
COMPU_1	60	40	6	40	4	150	40	6
COMPU_2	60	20	6	15	5	130	40	6
COMPU_3	60	20	6	20	5	130	40	6
COMPU_4	60	20	6	15	5	130	40	6
BIB_1	50	35	5	-	-	-	35	5
BIB_2	50	35	5	25	3	110	35	5
BIB_3	50	35	5	100	5	130	35	5

(Continuación del cuadro 21)

BIB_4	50	25	5	-	-	-	35	5
BIB_5	50	35	5	-	-	-	35	5
LIMO_1	60	35	6	25	3	130	40	6
LIMO_2	60	35	6	40	4	130	40	6
LIMO_3	60	35	6	40	4	130	40	6
LIMO_4	60	35	6	40	4	130	40	6
LIMO_5	60	25	5	-	-	-	25	5
LIMO_6	60	25	6	20	4	130	40	6
LIMO_7	60	35	6	25	3	130	40	6
VI_1	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_2	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_3	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_4	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_5	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_6	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_7	50	35	5	-	-	-	35	5
VI_8	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_1	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_2	50	35	5	-	-	-	30	5
COME_3	50	35	5	-	-	-	30	5
COME_4	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_5	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_6	50	35	5	-	-	-	30	5
COME_7	50	35	5	-	-	-	30	5
COME_8	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_9	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_10	50	35	5	-	-	-	30	5
COME_11	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_12	50	35	5	-	-	-	30	5
COME_13	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_14	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_15	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_16	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_17	50	35	5	-	-	-	35	5
COME_18	50	35	5	-	-	-	35	5

Fuente: Elaboración propia.

Diferencias de resultados entre metodologías

En los cuadros 22 y 23 se representan en valores de porcentajes la diferencia entre los esfuerzos internos obtenidos con el método rígido convencional y el método de interacción suelo-estructura para las cimentaciones del suelo con 10 Ton/m² (ver cuadro 16) y 30 Ton/m² (ver cuadro 17) de capacidad admisible. En el gráfico 1,2 y 3 se muestran representados los porcentajes mostrados en los cuadros 22 y 23. El porcentaje se realiza dividiendo la magnitud del esfuerzo obtenido con el método de interacción suelo estructura entre el esfuerzo obtenido con el método rígido convencional, como se muestra a continuación $\left(\frac{ISE}{Conv} - 1\right) \cdot 100$. Una vez calculados los porcentajes, se determina la mediana de esos porcentajes asociados a cada grupo (de cada edificio) de cimentaciones y se plasman en los tres gráficos antes mencionados.

CUADRO 22. Porcentajes de diferencia entre esfuerzos internos obtenidos por ambas metodologías para las cimentaciones en el suelo de 10 Ton/m² de capacidad admisible				
Cimentación	Pisos	% Diferencia entre CONV-ISE		
		Vu	Mu_Inf	Mu_Sup
BIB_1	2	30,35%	53,04%	1455,05%
BIB_2	2	-8,74%	11,66%	1326,41%
BIB_3	2	-15,96%	22,68%	1107,45%
BIB_4	2	0,53%	16,54%	1207,84%
BIB_5	2	26,57%	46,77%	1331,03%
VI_1	2	152,37%	53,10%	50,78%
VI_2	2	114,98%	40,42%	87,23%
VI_3	2	94,49%	38,30%	97,89%
VI_4	2	78,49%	30,48%	312,34%
VI_5	2	237,27%	112,00%	-35,89%
VI_6	2	151,27%	53,21%	37,50%
VI_7	2	115,86%	47,93%	19,73%
VI_8	2	116,76%	51,60%	21,73%
COME_1	2	56,41%	39,36%	2140,77%
COME_2	2	-19,02%	25,66%	909,10%
COME_3	2	-10,43%	29,48%	993,66%
COME_4	2	5,79%	42,43%	2634,60%
COME_5	2	39,59%	24,94%	1069,23%
COME_6	2	-18,65%	24,27%	1019,30%
COME_7	2	-0,10%	23,79%	1055,46%
COME_8	2	40,06%	25,30%	883,15%
COME_9	2	47,41%	29,03%	638,80%
COME_10	2	-11,39%	30,07%	958,80%
COME_11	2	-6,62%	31,57%	1146,46%
COME_12	2	-2,51%	26,31%	1079,21%
COME_13	2	5,19%	24,77%	969,29%
COME_14	2	141,24%	66,44%	-16,38%
COME_15	2	170,81%	103,09%	9,04%
COME_16	2	167,33%	97,58%	30,85%
COME_17	2	150,52%	84,18%	96,26%
COME_18	2	76,89%	48,56%	-77,76%
CL_1	3	19,22%	25,23%	657,27%
QUIM_3	4	-2,15%	20,73%	708,69%
QUIM_4	4	-1,76%	23,27%	808,64%

(Continuación del cuadro 22)

LIMO_1	4	-15,85%	16,69%	1052,74%
LIMO_2	4	-17,72%	16,54%	1042,42%
LIMO_3	4	-20,67%	14,32%	1038,43%
LIMO_4	4	-19,91%	13,90%	1033,55%
LIMO_5	4	5,37%	38,65%	1376,74%
LIMO_6	4	-26,03%	9,93%	1106,07%
LIMO_7	4	-10,01%	21,30%	982,93%
COMPU_1	5	-35,64%	0,34%	1864,60%
COMPU_2	5	-31,75%	-13,33%	1780,98%
COMPU_3	5	-26,43%	-11,34%	1834,46%
COMPU_4	5	-26,24%	-14,50%	1782,98%

Fuente: Elaboración propia.

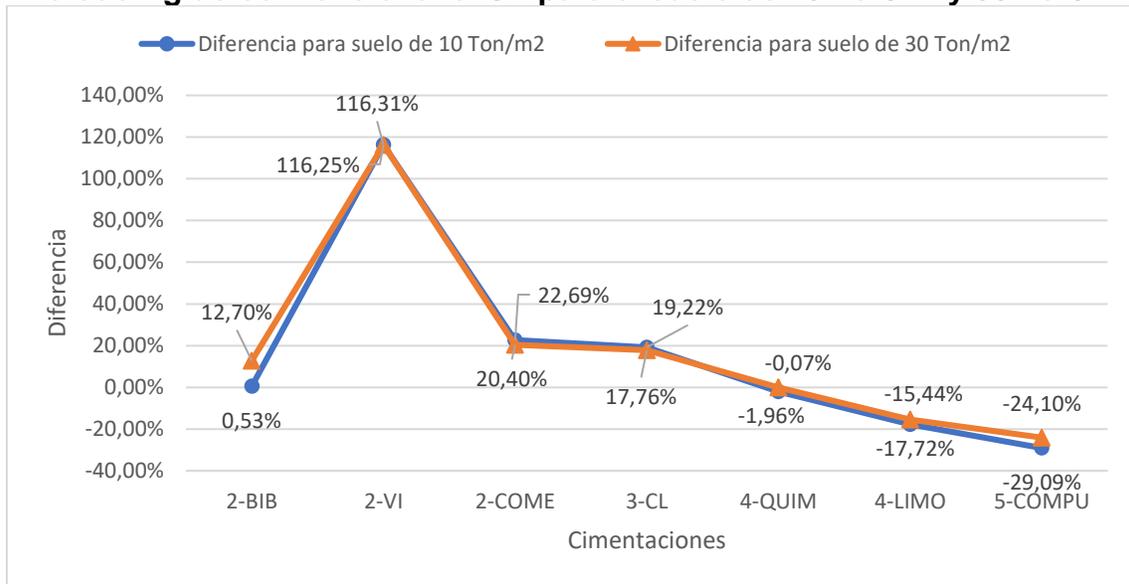
CUADRO 23. Porcentajes de diferencia entre esfuerzos internos obtenidos por ambas metodologías para las cimentaciones en el suelo de 30 Ton/m² de capacidad admisible				
Cimentación	Pisos	% Diferencia entre CONV-ISE		
		Vu	Mu_Inf	Mu_Sup
BIB_1	2	18,10%	41,93%	3122,20%
BIB_2	2	4,35%	-1,34%	6426,57%
BIB_3	2	-12,47%	8,73%	4816,20%
BIB_4	2	12,70%	-0,46%	4004,65%
BIB_5	2	23,10%	39,74%	3359,73%
VI_1	2	152,16%	52,52%	49,96%
VI_2	2	115,29%	34,84%	149,95%
VI_3	2	94,40%	37,49%	109,60%
VI_4	2	78,46%	29,82%	329,62%
VI_5	2	237,36%	110,42%	-34,66%
VI_6	2	151,21%	52,42%	39,97%
VI_7	2	115,82%	46,87%	28,06%
VI_8	2	116,68%	50,53%	27,56%
COME_1	2	23,66%	25,96%	3887,36%
COME_2	2	9,63%	15,88%	2893,16%
COME_3	2	3,65%	17,63%	3851,85%
COME_4	2	17,14%	28,11%	2849,53%
COME_5	2	32,51%	14,18%	1843,23%
COME_6	2	7,49%	13,48%	5112,05%
COME_7	2	12,13%	12,76%	5503,45%
COME_8	2	29,91%	15,14%	2175,12%

(Continuación del cuadro 23)

COME_9	2	31,44%	17,44%	1616,75%
COME_10	2	-0,67%	17,91%	3963,67%
COME_11	2	13,36%	17,41%	4969,74%
COME_12	2	1,46%	12,71%	5161,53%
COME_13	2	2,35%	13,17%	2096,20%
COME_14	2	141,24%	65,12%	-14,55%
COME_15	2	170,77%	102,01%	9,74%
COME_16	2	167,27%	96,44%	32,00%
COME_17	2	150,45%	83,25%	97,41%
COME_18	2	76,78%	47,76%	-73,24%
CL_1	3	17,76%	8,80%	1198,20%
QUIM_3	4	1,13%	8,03%	685,75%
QUIM_4	4	-1,26%	9,96%	973,24%
LIMO_1	4	-12,94%	-1,85%	5394,34%
LIMO_2	4	-18,96%	-2,70%	4482,02%
LIMO_3	4	-16,12%	-3,45%	2698,78%
LIMO_4	4	-15,44%	-3,47%	2594,09%
LIMO_5	4	30,13%	25,50%	5496,59%
LIMO_6	4	-22,48%	-2,37%	1474,00%
LIMO_7	4	-13,50%	2,21%	3483,50%
COMPU_1	5	4,71%	-3,69%	2408,75%
COMPU_2	5	-27,30%	-17,28%	4134,37%
COMPU_3	5	-24,50%	-17,21%	3657,55%
COMPU_4	5	-23,70%	-18,31%	3333,48%

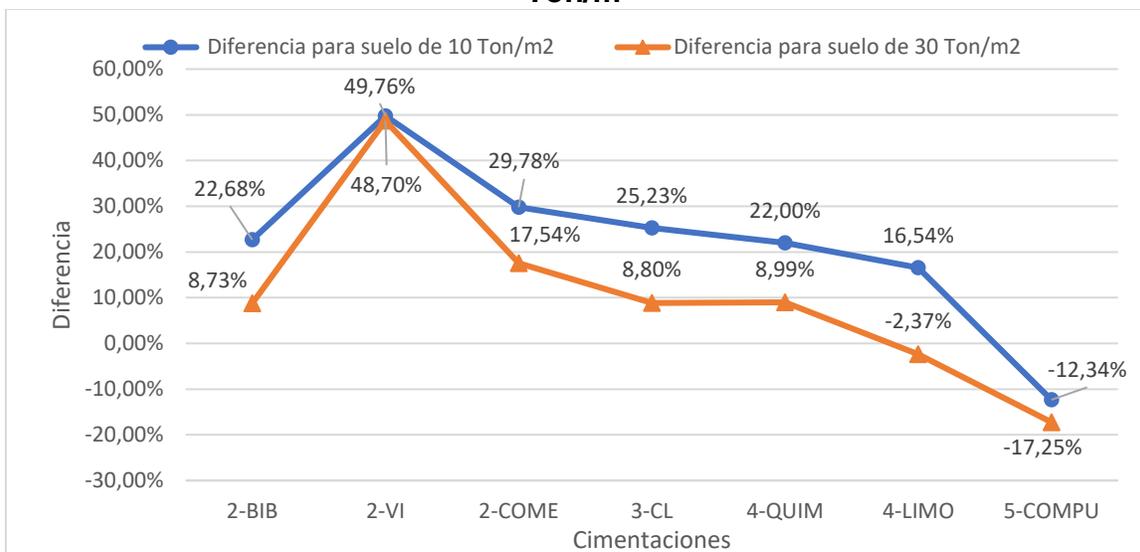
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 1. Porcentajes de diferencia entre los esfuerzos de cortante obtenidos con el método rígido convencional e ISE para el suelo de 10 Ton/m² y 30 Ton/m²



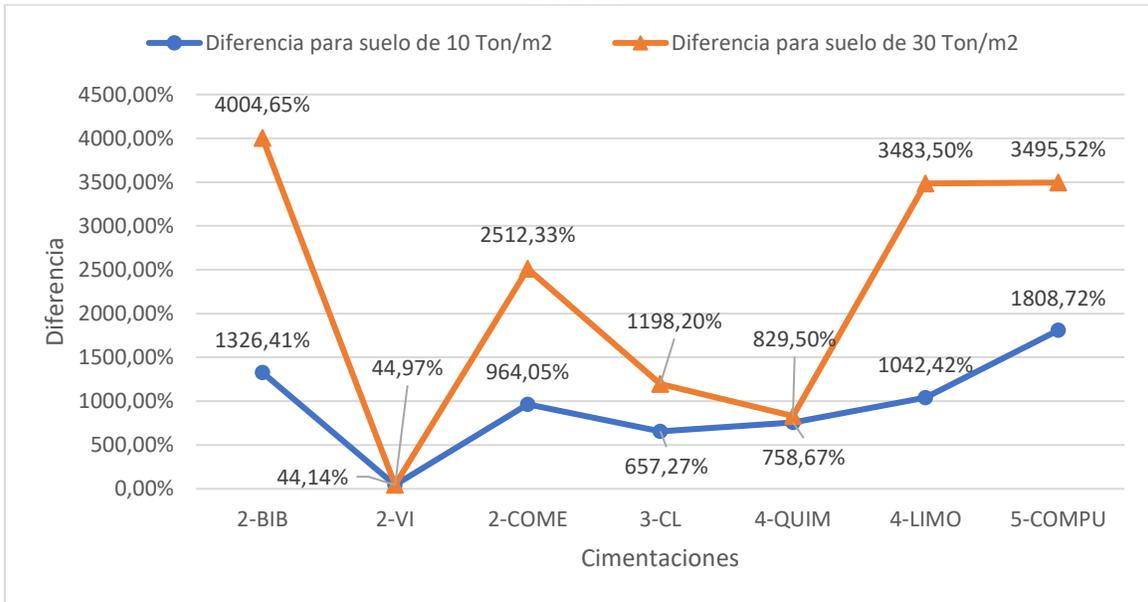
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 2. Porcentajes de diferencia entre los esfuerzos de momento inferior obtenidos con el método rígido convencional e ISE para el suelo de 10 Ton/m² y 30 Ton/m²



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. Porcentajes de diferencia entre los esfuerzos de momento superior obtenidos con el método rígido convencional e ISE para el suelo de 10 Ton/m² y 30 Ton/m²

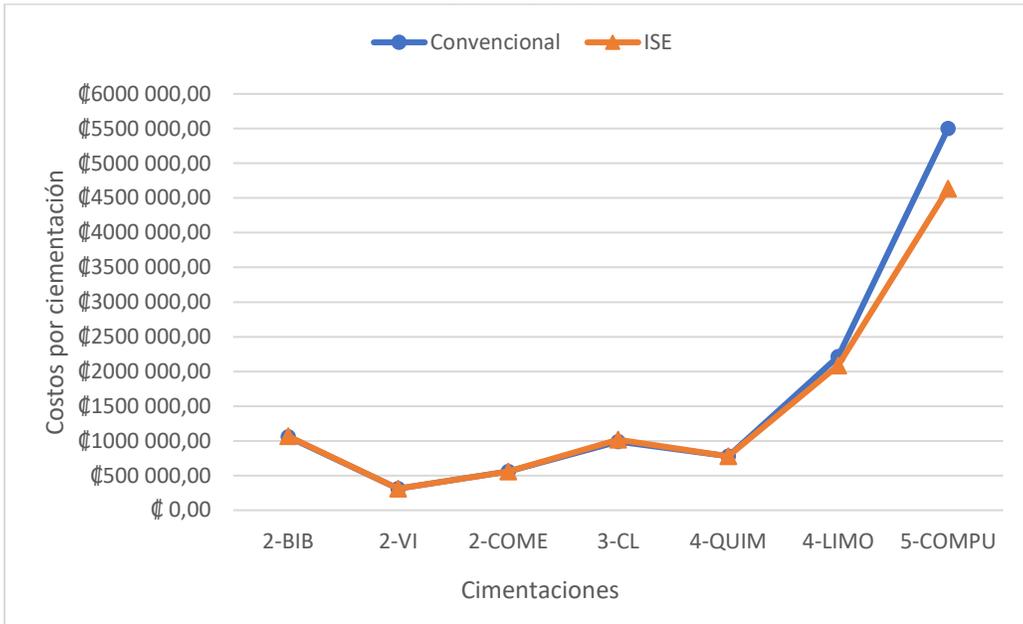


Fuente: Elaboración propia.

Costos

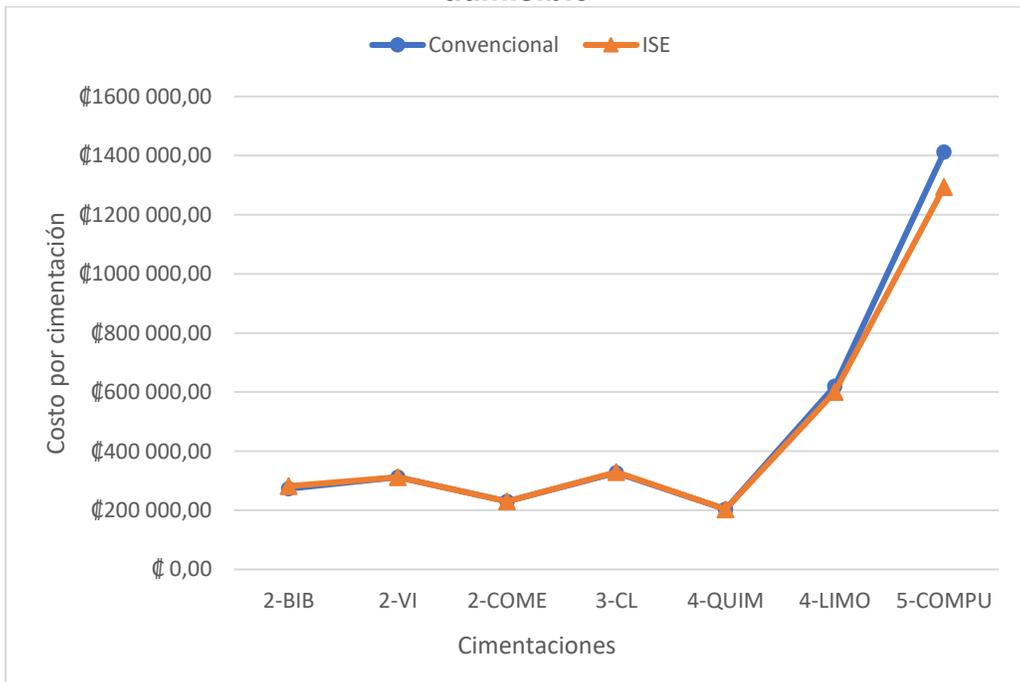
En los gráficos 4 y 5 se muestra la mediana de los valores asociados al costo de cada cimentación para los suelos de 10 Ton/m² y 30Ton/m² de capacidad admisible, modeladas por el método rígido convencional e ISE. En el gráfico 6 se muestra la mediana de los porcentajes de diferencia de los costos de las cimentaciones para ambos suelos.

Gráfico 4. Costos de cimentaciones para el suelo de 10 Ton/m² de capacidad admisible



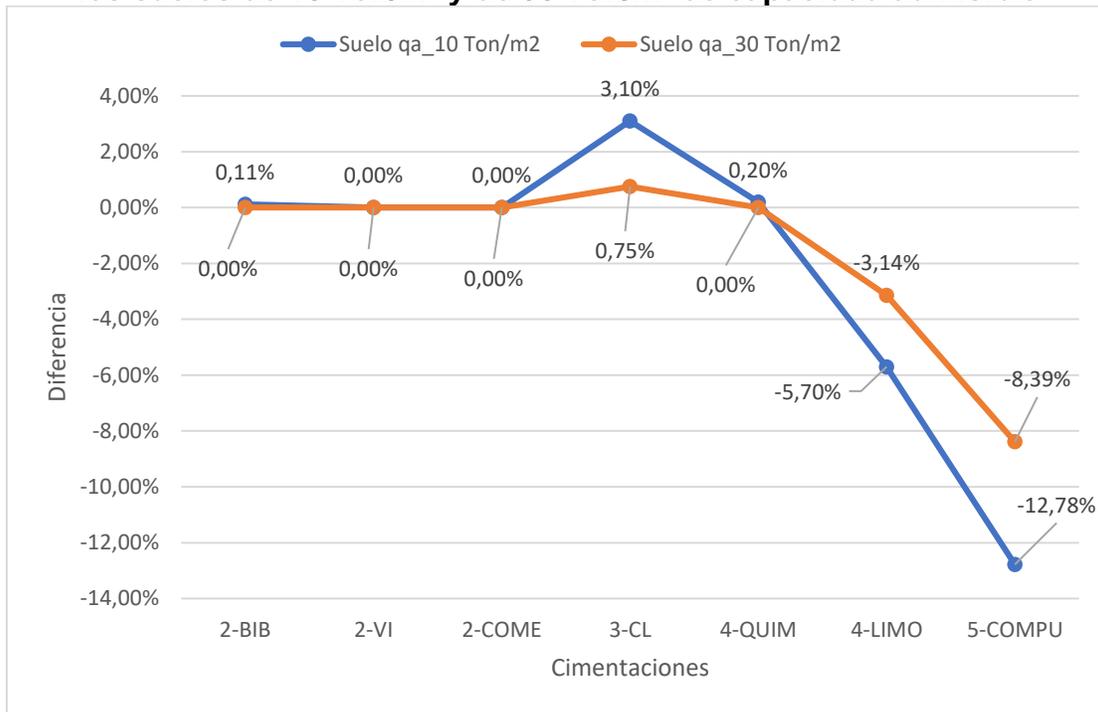
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 5. Costos de cimentaciones para el suelo de 30 Ton/m² de capacidad admisible



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 6. Porcentajes de diferencia en el costo de las cimentaciones modeladas en los suelos de 10 Ton/m² y de 30 Ton/m² de capacidad admisible



Fuente: Elaboración propia.

Análisis de Resultados

En el trabajo realizado, lo que se hizo fue una serie de modelaciones para cimentaciones superficiales, más específicamente placas aisladas cuadradas, para edificios de 2 a 5 pisos de altura. El objetivo es determinar si existe o no diferencias significativas en el análisis y diseño estructural, así como en los costos de construcción de las cimentaciones cuadradas aisladas, utilizando dos metodologías de análisis y dos suelos propuestos con diferentes parámetros. Una de las metodologías considera la interacción suelo-estructura (Winkler) y otra que no considera la interacción suelo-estructura (Rígido convencional). Para los suelos se supone uno con capacidad admisible baja (10 Ton/m^2) y otro con una capacidad admisible alta (30 Ton/m^2).

El análisis comenzó con la obtención de las reacciones de cortante y momento tomadas al correr los modelos de los edificios (modelados en SAP 2000). Los valores de cortante y momento que se utilizaron para la modelación de cada una de las cimentaciones se presentan en los cuadros 11, 12, 13 y 14. Obtenidas las reacciones se procede a la determinación de las dimensiones de L y B para las cimentaciones, las cuales son presentadas en el cuadro 15. Los valores de los cuadros 11 y 12 fueron usados para la obtención de las dimensiones de L y B, mientras que los cuadros 13 y 14 fueron utilizados para el diseño de las cimentaciones.

En el cuadro 15 se puede observar que las dimensiones de las cimentaciones son inversamente proporcionales a la capacidad admisible del suelo, debido que al aumentar la capacidad admisible del suelo se necesita un área de menor tamaño de la cimentación para poder soportar los esfuerzos que bajan de la columna. Sin embargo, hay excepciones en las cimentaciones del VI_1 hasta VI_8 y las del COME_14 hasta la COME_18, debido a que sus dimensiones son iguales tanto para el suelo de 10 Ton/m^2 y 30 Ton/m^2 de capacidad admisible, de esta manera se logra tener una excentricidad menor o igual a $1/6$ de

B y L para de esta manera no realizar la verificación al volcamiento.

Una vez obtenidas los esfuerzos y las dimensiones de las cimentaciones se modelaron en SAP 2000 y se corrieron los modelos para posteriormente determinar los esfuerzos internos de las cimentaciones. Importante hay que mencionar que los espesores de las cimentaciones fueron determinados entre 50 cm y 60 cm (ver cuadro 18,19,20 y 21) siendo estos mayores a los 25 cm indicados en el ACI 318-19. Estos valores de espesor pueden ser menores si se hace un diseño optimizado, sin embargo, para este proyecto no forma parte de los objetivos y alcances un diseño optimizado. Al correr los modelos para cada una de las cimentaciones se obtuvieron los esfuerzos de cortante (V_u), momento inferior y superior (M_u). Los valores se presentan en el cuadro 16 y 17, en el cuadro 16 se encuentran los esfuerzos obtenidos para el suelo de 10 Ton/m^2 de capacidad admisible, tanto para el método rígido convencional como para el método de interacción suelo-estructura. De la misma forma en el cuadro 17 se presentan los esfuerzos internos de las cimentaciones obtenidos para el suelo de 30 Ton/m^2 de capacidad admisible.

Obtenidos los esfuerzos internos se procede al diseño de las cimentaciones donde se calculó la cuantía de acero de refuerzo necesaria para soportar en momento a flexión. En el cuadro 18,19,20 y 21 se presentan los resúmenes de las cantidades de acero para cada cimentación, la separación entre las varillas, el calibre de la varilla, espesor (t) de cada cimentación y la longitud de los bastones. Se usa una doble malla de refuerzo debido a la presencia tanto en la parte inferior como superior de las cimentaciones. Por lo general, los momentos superiores son de magnitudes bajas, por tanto, se suele requerir la cantidad de acero mínimo. Para los momentos inferiores la cuantía de acero se calculó tomando la cuantía de acero mínima y esta se compara la cantidad de acero requerido. Al no satisfacer la cantidad de acero requerido con la cuantía mínima, se colocó en forma de bastones la cantidad faltante de acero que cumple con una cantidad igual o mayor a la del acero requerido. La hoja de cálculo se realizó para el diseño de una sección de 1 metro de longitud.

A partir de los cuadros 16 y 17 se realizó una comparación (ver cuadros 22,23 y gráficos 1,2 y 3) entre los valores de los esfuerzos obtenidos a través de los dos métodos (Convencional e ISE) en los dos tipos de suelo (10 Ton/m^2 y 30 Ton/m^2). En el gráfico 1 se presentan las diferencias en los

esfuerzos de cortante en las cimentaciones modeladas, tanto por el método “convencional rígido” como por el método de “interacción suelo-estructura”. Se presentan de forma simultánea los resultados obtenidos en el suelo de 10 Ton/m² (línea azul) y 30 Ton/m² (línea naranja). En la parte inferior del gráfico 1 se presenta el edificio al que se asocia cada resultado y el número de pisos (ver también cuadros 22,23) que posee cada edificio (número a la izquierda).

En el gráfico 1 se aprecia el porcentaje de diferencia entre los esfuerzos de cortante para el suelo de 10 Ton/m² (línea azul) de capacidad admisible. Los porcentajes en positivo son indicativos de que los esfuerzos obtenidos a través del método de “interacción suelo-estructura (ISE)” son mayores a los obtenidos por el método “convencional rígido”. Caso contrario si los porcentajes son negativos, los esfuerzos obtenidos por el método “convencional rígido” son mayores a los del método de “interacción suelo-estructura”. Por tanto, con respecto a los esfuerzos de cortante en el suelo de 10 Ton/m² en los edificios de 2 (BIB, VI y COME) a 3 (CL) pisos de altura se puede ver que presentan porcentajes positivos, los cuales indican que los esfuerzos obtenidos mediante el método “ISE” son mayores a los obtenidos por medio del método “convencional rígido”. Sin embargo, a partir de los edificios de 4 a 5 pisos el comportamiento cambia, siendo los esfuerzos obtenidos mediante el método “convencional rígido” mayores a los del método “ISE”.

Respecto a los porcentajes obtenidos en el suelo de 30 Ton/m² (línea naranja) de capacidad admisible, estos presentan un comportamiento similar a los presentados anteriormente en el suelo de 10 Ton/m² de capacidad admisible. Apreciando el gráfico 1 se puede ver la coincidencia en casi todos los puntos de ambas líneas, exceptuando el primer (2-BIB) y último (5-COMPU) punto con una diferencia significativa de alrededor del 12% y 5% respectivamente. También se puede ver que en el segundo punto (2-VI), el porcentaje de diferencia de los esfuerzos en ambos suelos son alrededor del 116% mayores al analizar las cimentaciones por medio del método de “interacción suelo-estructura”. La causa a esta diferencia está asociada al momento de modelar en SAP 2000 las cimentaciones e introducir las solicitaciones últimas dinámicas, al estas poseer momentos ($M_{x,y}$) relativamente grandes en comparación a las cargas axiales (P). Esto tiende a producir que la excentricidad ($M_{x,y}/P$) sea significativamente grande

(mayor a 20 cm) para todo este grupo (2-VI) de cimentaciones, aunado al método de “interacción suelo-estructura” que toma en consideración el suelo. Mirando con atención se puede observar que la mayoría (excepto el primero) de los puntos tienden ligeramente a converger al 0% para los cimientos del suelo de 30 Ton/m².

En el gráfico 2 se presentan las diferencias en los esfuerzos del momento inferior en las cimentaciones modeladas, tanto por el método “convencional rígido” como por el método de “interacción suelo-estructura”. Se presentan de forma simultánea los resultados obtenidos en el suelo de 10 Ton/m² (línea azul) y 30 Ton/m² (línea naranja). En la parte inferior del gráfico 2 se presenta el edificio al que se asocia cada resultado y el número de pisos que posee cada edificio (número a la izquierda). En este gráfico se puede apreciar cómo tanto para los porcentajes del suelo de 10 Ton/m² y el de 30 Ton/m² son valores positivos en el mayor de los casos, exceptuando punto final (COMPU) para ambos suelos y el penúltimo para el suelo de 30 Ton/m². Esto indica que en la mayoría de las cimentaciones el método de “interacción suelo-estructura” presentó esfuerzos mayores a los obtenidos por el método “convencional rígido”, ya que solo tres puntos indican lo contrario (números negativos).

En este gráfico se observa cómo el momento para las cimentaciones del edificio de VIESA (2-VI) presenta los mayores porcentajes de diferencia de alrededor del 49% (a favor del método ISE), esto debido a lo que antes se analizó en el gráfico 1 respecto a la relación de los momentos ($M_{x,y}$) y la carga axial (P). Para la línea que representa los resultados del suelo de 30 Ton/m² se aprecia una convergencia mayor al 0% en sus puntos en comparación a la que representa el suelo de 10 Ton/m². También se puede apreciar como hay un mayor distanciamiento entre los puntos de cada línea en comparación a los presentados en el gráfico 1. Donde se demuestra una mayor variabilidad en los resultados de los momentos en comparación a los cortantes cuando se modela a través de los modelos que consideran y no la interacción suelo-estructura. Es sumamente importante la variabilidad en los momentos inferiores ya que con base en ellos se rige el diseño para el acero de refuerzo de las cimentaciones, cuyo impacto se verá reflejado en los costos de construcción.

En el gráfico 3 se presentan los porcentajes de diferencias entre ambos métodos (ISE y

Convencional rígido) para los suelos de 10 Ton/m² (línea azul) y 30 Ton/m² (línea naranja) de capacidad admisible. En este gráfico se observa que la línea azul que representa al suelo de 10 Ton/m², cada uno de los porcentajes presenta un valor positivo, lo cual es indicativo de que los esfuerzos obtenidos por el método de “interacción suelo-estructura” son mayores, con porcentajes que varían desde los 44% hasta más de 1800% mayores. En el caso del suelo de 30 Ton/m² presenta porcentajes de diferencia aún mayores que los del suelo de 10 Ton/m², ya que van desde los 44% hasta más de 4000%. Podemos ver que las líneas (azul y naranja) no coinciden en la mayoría de los puntos y no se sigue un patrón, ya que por ejemplo para los edificios de 2 pisos de altura (BIB, VI y COME) los porcentajes dan saltos significativos desde 40% a más de 1000%. De igual manera, los momentos superiores al ser esfuerzos con valores relativamente bajos en el momento del diseño para el acero de refuerzo se aplican la cuantía de acero mínimo (ver ecuación 43, 44).

Procediendo con el análisis pasamos a la sección de los costos, esta consta de 3 gráficos (4, 5 y 6). En los gráficos 4 y 5 se presentan los costos en colones para las cimentaciones en función del método de análisis (ISE o Convencional rígido) seleccionado. En el gráfico 4 se presentan los costos para el suelo de 10 Ton/m², en este gráfico la línea azul representa a los costos de la cimentación por el método “convencional rígido” y la naranja representa a los obtenidos a través del método de “interacción suelo-estructura”. Se puede ver que ambas líneas (azul y naranja) presentan valores similares a partir de las cimentaciones BIB (Edificio de Biblioteca 2 plantas) hasta las cimentaciones de QUIM (Edificio de Química 4 plantas). Caso contrario para las cimentaciones de LIMO (Edificio de Escuela Limoncito 4 pisos) y COMPU (Edificio de Computación 5 pisos) tienen valores que no coinciden, con diferencias de alrededor de ₡200000 para LIMO y de alrededor de ₡1000000 para COMPU. Estas reducciones en los costos se dan en las cimentaciones que fueron modeladas a través del método de “interacción suelo-estructura”. Debido a que la mediana de los valores de cortantes obtenidos son entre un 15% y un 30% menores (ver gráfico 1) con los obtenidos a través del método convencional rígido, con lo cual al momento de realizar la revisión por cortante se tiene que incorporar una mayor cuantía de acero para que cumpla con $\phi V_n \geq V_u$.

El gráfico 5 presenta los resultados de costos para el suelo de 30 Ton/m². Al igual que el gráfico 4 presenta un comportamiento similar en la coincidencia de los puntos de cada línea. Como en el gráfico 4, se aprecia una reducción en los costos asociados a las cimentaciones modeladas con el método de “interacción suelo-estructura”. Sin embargo, la diferencia en los costos es significativamente menor para LIMO y COMPU llegando a ser de alrededor ₡20000 y ₡120000 respectivamente. A partir del gráfico 4 y 5 se realizó el gráfico 6 en el cual se presentan en porcentajes la diferencia los costos para las cimentaciones modeladas tanto por el método de “interacción suelo-estructura” como el “Convencional rígido”. En la línea azul se representan los resultados obtenidos para el suelo de 10 Ton/m² y en la naranja para el suelo de 30 Ton/m². Los porcentajes de diferencia se calcularon de la siguiente forma $\left(\frac{ISE}{C_{conv}} - 1\right) \cdot 100$. En este gráfico se puede observar cómo para los edificios de 2 pisos de altura la diferencia en precios es de 0% sin importar el método o el tipo de suelo. Con lo cual se puede concluir que respecto a los edificios de 2 pisos es irrelevante el tipo de método (ISE o convencional) o suelo que se utilice ya que no hay ningún impacto en lo respectivo a los costos. Esto es debido a que por ser edificios con esfuerzos de cortantes y momentos relativamente bajos (ver cuadro 16 y 17), al momento del diseño terminan dentro de los parámetros mínimos.

Por otro lado, cuando se llega al edificio de 3 plantas se evidencia un cambio significativo para los resultados en el suelo de 10 Ton/m² con un 3,1% a favor del método “ISE”. No obstante, este resultado no puede ser representativo debido a que solo se contó con una cimentación para hacer el análisis y diseño estructural y, por lo tanto, no se puede llegar a una conclusión relevante. Para los porcentajes de QUIM y LIMO ambos de 4 pisos, se aprecia que para el suelo de 10 Ton/m² los valores están dividido. Donde para QUIM la diferencia es de 0,2% (casi cero) a favor del método “ISE” y para LIMO es de -5,7% a favor del método “convencional rígido”. Podemos ver como para edificios de igual cantidad de pisos pueden variar los costos a favor de cada uno de los métodos de análisis usados para este proyecto. Estas diferencias están asociadas a las características propias de cada edificio.

Para el edificio de 5 pisos se puede ver cómo los porcentajes tienden a números negativos

lo que indica que los costos para las cimentaciones hechas con el método "convencional rígido" son mayores a los costos obtenidos con el método "ISE". A su vez, se puede apreciar como los costos asociados al suelo de 10 Ton/m² presentan una mayor diferencia de alrededor del -12,78% en comparación al -8,39% que presenta el suelo de 30 Ton/m². Al ver estas diferencias entre costos para los edificios se puede concluir que a partir de los edificios de 4 pisos se comienza a evidenciar un aumento significativo en los costos para la construcción de cimentaciones en ambos suelos cuando se utiliza el método "rígido convencional". El aumento tiene una mayor tendencia en el suelo de menor capacidad de carga admisible (10Ton/m²) y tiende a disminuir conforme aumenta la capacidad admisible del suelo.

Conclusiones

- De este trabajo se puede concluir que, al momento de analizar cimentaciones cuadradas aisladas los esfuerzos de cortante, momento inferior y superior son mayores al usar el método que considera la interacción suelo-estructura (ISE) en la mayoría de las cimentaciones que cuando se usa el método rígido convencional, debido a que en la ISE se toma en consideración las características del suelo circundante.
- Conforme aumenta la capacidad admisible del suelo los porcentajes de diferencia de los esfuerzos de cortante y momento inferior de las cimentaciones convergen a cero, sin embargo, sucede lo contrario a medida que disminuye la capacidad admisible del suelo.
- Para los momentos superiores obtenidos de los grupos de cimentaciones, aunque los porcentajes de diferencias entre métodos sean en algunos casos mayores a 1000%, estos poseen poca influencia en el diseño debido a las bajas magnitudes que presentan, ya que terminan siendo cubierta por el A_s mínimo o A_s de temperatura.
- Cuando la relación del momento entre la fuerza axial ($M_{x,y}/P$) genera excentricidades grandes (mayores a 20 cm), se concluye que se produce un incremento significativo en los esfuerzos de cortante y momento inferior.
- Se concluyó que para los edificios de 2 pisos de altura es irrelevante el tipo de método (ISE o convencional) o suelo que se utilice ya que no hay ningún impacto en lo respectivo a los costos de construcción. Esto es debido a que por ser edificios con esfuerzos de cortantes y momentos relativamente bajos, al momento del diseño terminan dentro de los parámetros mínimos.
- Referente al punto anterior es recomendable para edificios de dos plantas

o menos, realizar el análisis de las cimentaciones usando el método convencional rígido, debido a que presenta una menor dificultad en su procedimiento y requiere una menor demanda computacional.

- Al momento de realizar el análisis de las cimentaciones para edificios 4 o 5 pisos de altura, ya sea en suelo de baja o alta capacidad soportante, es recomendable usar el método de interacción suelo-estructura (ISE). Debido a que los esfuerzos de cortantes obtenidos por el método rígido convencional tienden a ser considerablemente altos (> 100000 kg) y presentan valores mayores de alrededor de un 15% y 30% con respecto a los obtenidos por el método ISE. Por tanto, estos influyen en el incremento significativo de los costos de construcción para las cimentaciones por causa de las propias características de la metodología (convencional rígido).
- Para edificios de 3 pisos de altura no se puede dar una conclusión debido a que solo se poseía una cimentación para realizar la comparación.

Recomendaciones

- Debido a que solo se analizaron cimentaciones aisladas cuadradas, se recomienda realizar un análisis para otro tipo de cimentaciones superficiales como losa, placas corridas, losas de cimentación, etc.
- Referente al punto anterior, como las funciones de impedancias poseen un apartado para el análisis a pilotes, realizar un estudio donde se compare las diferencias entre metodologías de análisis para este tipo de cimientos.
- Como no se contó con suficientes cimentaciones de edificios de 3 pisos, se recomienda realizar un análisis donde se cuente con una mayor cantidad para así obtener un resultado representativo.
- Realizar el mismo proceso hecho en este proyecto para una mayor cantidad de edificios que posean una mayor cantidad de pisos de altura.
- Aplicar lo realizado en este proyecto para edificios cuyas super estructuras se hayan diseñado para los mismos parámetros sísmicos.
- Implementar lo realizado en este proyecto y aplicarlo en otras estructuras que no sean edificios (puentes, torres de transmisión, etc.).
- Utilizar diferentes espesores en las cimentaciones para determinar de qué manera influye en los resultados obtenidos.

Apéndices

Los apéndices que se presentan corresponden a:

1. Ejemplo de diseño de la cimentación BIB_3, con toda su memoria de cálculo adjunta para el método de interacción suelo-estructura en el suelo de 10 Ton/m².
2. Planos para el ejemplo de la cimentación BIB_3, para el método de interacción suelo-estructura, del suelo de 10 Ton/m² y 30 Ton/m².
3. Coeficientes de rigideces para los resortes obtenidos con las funciones de impedancia de Gazetas para el suelo de 10 y 30 Ton/m² de capacidad admisibles.
4. Sobrepresiones estáticas para el suelo de 10 Ton/m² y 30 suelo Ton/m².
5. Sobrepresiones dinámicas para el suelo de 10 Ton/m² y 30 suelo Ton/m².
6. Ejemplo de diseño de la cimentación BIB_3, con toda su memoria de cálculo adjunta para el método convencional rígido en el suelo de 10 Ton/m².
7. Planos para el ejemplo de la cimentación BIB_3, para el método convencional rígido, del suelo de 10 Ton/m² y 30 Ton/m².

Apéndice 1

Diseño por flexión en M↓

Datos para diseño:

Espeor	50	cm
Recubrimiento:	7,5	cm
Luz	3,7	m
d:	42,5	cm
b:	100	cm
Fy(grado 60):	4200	kg/cm ²
f'c:	245	kg/cm ²

Momento: **Mu:** 2066423 kg-cm

Supongo un ϕ : ϕ : 0,9

Calculamos Rn: $Rn = \frac{Mu}{\phi * b * d^2}$
Rn: 12,71156017

Calculamos ρ : $\rho = \frac{0,85 * f'c / fy}{1 - \sqrt{1 - (2Rn / 0,85 * f'c)}}$
 ρ : 0,00313

As: $\rho * b * d$
As: 13,28142615 cm²

Ahora comprobar el $\phi > 0,9$
a: $(As * fy) / (0,85 * f'c * b)$
a: 2,678606956

Como el concreto es menor a 280 kg/cm²
 β : 0,85

Ahora: $a = \beta * C$
Así C: 3,151302301

Y finalente: $C/d \leq 0,375$

C/d: 0,074148289 < 0,375 Sección Controlada por la Tensión

As_{min}:
0,0018*bd: 7,65
0,0014*bd: 5,95

Por lo tanto el As a utilizar es:
As: 13,3 cm²

Colocar una malla # **5 @ 35 cm**

As malla: 7,634543491 cm²

El acero xtra a colocar es: As: 5,6 cm²

Para el número de varillas:

As1 #3:	0,7125 cm ²
As1 #4:	1,27 cm ²
As1 #5:	1,98 cm ²
As1 #6:	2,85 cm ²
As1 #7:	3,88 cm ²
As1 #8:	5,07 cm ²

Varilla #		#Varillas	Separación cm
3	7,93	8	12
4	4,46	5	21
5	2,85	3	43
6	1,98	2	85
7	1,46	2	85
8	1,11	2	85

Cantidad de bastones por flexión que se requieren: 3 Varillas # 5 a cada 35 cm
Por metro de profundidad

Cantida de varilla por flexión:

Varilla #	Espaciamiento @
Malla 5	35
Bastón 5	35

Diseño por flexión en M↑

Datos para diseño:

Espeor	50	cm
Recubrimiento:	7,5	cm
Luz	3,7	m
d:	42,5	cm
b:	100	cm
Fy(grado 60):	4200	kg/cm ²
f'c:	245	kg/cm ²

Momento: **Mu:** 75574 kg-cm

Supongo un ϕ : ϕ : 0,9

Calculamos Rn: $Rn = \frac{Mu}{\phi * b * d^2}$
Rn: 0,464891965

Calculamos ρ : $\rho = \frac{0,85 * f'c / fy}{1 - \sqrt{1 - (2Rn / 0,85 * f'c)}}$
 ρ : 0,00011

As: $\rho * b * d$
As: 0,470952652 cm²

Ahora comprobar el $\phi > 0,9$
a: $(As * fy) / (0,85 * f'c * b)$
a: 0,094982047

Como el concreto es menor a 280 kg/cm²
 β : 0,85

Ahora: $a = \beta * C$
Así C: 0,111743585

Y finalente: $C/d \leq 0,375$

C/d: 0,002629261 < 0,375 Sección Controlada por la Tensión

As_{min}:
0,0018*bd: 7,65
0,0014*bd: 5,95

Por lo tanto el As a utilizar es:
As: 7,65 cm²

Colocar una malla # **5 @ 35 cm**

As malla: 7,634543491 cm²

El acero xtra a colocar es: As: 0,02 cm²

Para el número de varillas:

As1 #3:	0,7125 cm ²
As1 #4:	1,27 cm ²
As1 #5:	1,98 cm ²
As1 #6:	2,85 cm ²
As1 #7:	3,88 cm ²
As1 #8:	5,07 cm ²

Varilla #		#Varillas	Separación cm	
3	0,02	1	85	#DIV/0!
4	0,01	1	85	#DIV/0!
5	0,01	1	85	#DIV/0!
6	0,01	1	85	#DIV/0!
7	0,00	1	85	#DIV/0!
8	0,00	1	85	#DIV/0!

Cantidad de bastones por flexión que se requieren: 0 Varillas # 0 a cada 0 cm
Por metro de profundidad

Cantida de varilla por flexión:

Varilla #	Espaciamiento @
Malla 5	35
Bastón	

REVISIÓN DE CAPACIDAD CORTANTE

El Vu obtenido del modelo es:

49471,85 kg

Vn: $Acv(\alpha\sqrt{f_c} + \rho_n f_y)$

Cantidad de mallas por utilizar:

2 malla si	→	$Vu \geq 0,5 Acv\sqrt{f_c}$
	→	$t \geq 20 \text{ cm}$
1 malla si	→	$Vu < 0,5 Acv\sqrt{f_c}$
	→	$t < 20 \text{ cm}$

mallas: 2

Separación:

t-2rec	cm	2 mallas
t/2	cm	1 malla
Sep:	35	cm

Varilla a usar (la de malla a flexión)

ACV:

t·BW	cm ²	5000 cm ²
Acv:		

OC:

Luz/t	< 1,5	oc= 0,80
	≥ 1,5	oc=0,53
ac:	0,53	

ρ_n :

Ramas*(Av/(t*sepi))

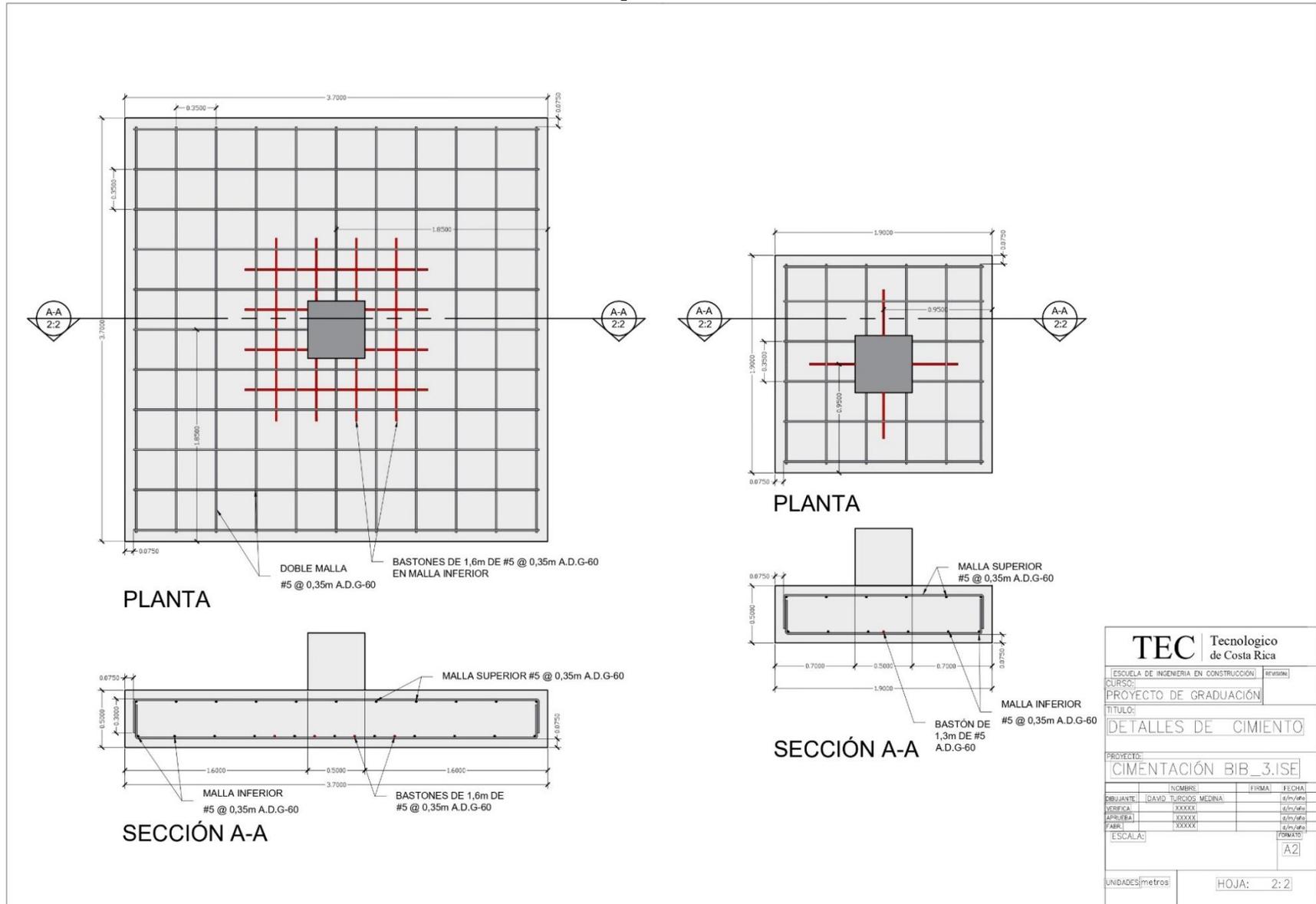
ρ_n : 0,00323

Vn: 109341,670 kg
 ϕ_v : 0,6
 $\phi_v \cdot Vn$: 65605,00187

$\phi V_n > V_u$ Cumple

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 2



Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 3

qadm: 10ton/m ²					Resorte central			Resorte lateral			Resorte esquinero		
Cimentación	Atotal(m2)	Ar_centrl(m ²)	Ar_late(m ²)	Ar_esqui(m ²)	kz(kgf/m)	kyy(kgf·m/rad)	kxx(kgf·m/rad)	kz(kgf/m)	kyy(kgf·m/rad)	kxx(kgf·m/rad)	kz(kgf/m)	kyy(kgf·m/rad)	kxx(kgf·m/rad)
CL_1	12,96	0,01	0,005	0,0025	43985,793	71784,052	57400,155	21992,897	35892,026	28700,077	10996,448	17946,013	14350,039
QUIM_3	10,24	0,01	0,005	0,0025	46150,796	67892,279	54386,477	23075,398	33946,140	27193,238	11537,699	16973,070	13596,619
QUIM_4	10,24	0,01	0,005	0,0025	46150,796	67892,279	54386,477	23075,398	33946,140	27193,238	11537,699	16973,070	13596,619
COMPU_1	22,09	0,01	0,005	0,0025	45387,444	142032,033	112389,251	22693,722	71016,017	56194,625	11346,861	35508,008	28097,313
COMPU_2	44,89	0,01	0,005	0,0025	44766,927	277327,786	217952,784	22383,464	138663,893	108976,392	11191,732	69331,946	54488,196
COMPU_3	44,89	0,01	0,005	0,0025	44766,927	277327,786	217952,784	22383,464	138663,893	108976,392	11191,732	69331,946	54488,196
COMPU_4	44,89	0,01	0,005	0,0025	44766,927	277327,786	217952,784	22383,464	138663,893	108976,392	11191,732	69331,946	54488,196
BIB_1	4,41	0,01	0,005	0,0025	47296,532	31602,344	26006,629	23648,266	15801,172	13003,315	11824,133	7900,586	6501,657
BIB_2	13,69	0,01	0,005	0,0025	45166,768	83083,607	66425,583	22583,384	41541,804	33212,791	11291,692	20770,902	16606,396
BIB_3	13,69	0,01	0,005	0,0025	45166,768	83083,607	66425,583	22583,384	41541,804	33212,791	11291,692	20770,902	16606,396
BIB_4	13,69	0,01	0,005	0,0025	45166,768	83083,607	66425,583	22583,384	41541,804	33212,791	11291,692	20770,902	16606,396
BIB_5	4,41	0,01	0,005	0,0025	47296,532	31602,344	26006,629	23648,266	15801,172	13003,315	11824,133	7900,586	6501,657
LIMO_1	22,09	0,01	0,005	0,0025	45253,992	140211,001	110948,277	22626,996	70105,500	55474,138	11313,498	35052,750	27737,069
LIMO_2	22,09	0,01	0,005	0,0025	45253,992	140211,001	110948,277	22626,996	70105,500	55474,138	11313,498	35052,750	27737,069
LIMO_3	22,09	0,01	0,005	0,0025	45253,992	140211,001	110948,277	22626,996	70105,500	55474,138	11313,498	35052,750	27737,069
LIMO_4	22,09	0,01	0,005	0,0025	45253,992	140211,001	110948,277	22626,996	70105,500	55474,138	11313,498	35052,750	27737,069
LIMO_5	8,41	0,01	0,005	0,0025	46460,099	59924,316	48021,148	23230,050	29962,158	24010,574	11615,025	14981,079	12005,287
LIMO_6	28,09	0,01	0,005	0,0025	44820,536	170417,591	135088,029	22410,268	85208,795	67544,014	11205,134	42604,398	33772,007
LIMO_7	22,09	0,01	0,005	0,0025	45114,421	138378,221	109498,007	22557,211	69189,110	54749,003	11278,605	34594,555	27374,502
VI_1	3,24	0,01	0,005	0,0025	48167,282	24615,362	20678,934	24083,641	12307,681	10339,467	12041,820	6153,841	5169,733
VI_2	3,24	0,01	0,005	0,0025	48167,282	24615,362	20678,934	24083,641	12307,681	10339,467	12041,820	6153,841	5169,733
VI_3	4	0,01	0,005	0,0025	47709,244	29602,796	24502,417	23854,622	14801,398	12251,209	11927,311	7400,699	6125,604
VI_4	3,24	0,01	0,005	0,0025	48167,282	24615,362	20678,934	24083,641	12307,681	10339,467	12041,820	6153,841	5169,733
VI_5	5,76	0,01	0,005	0,0025	47025,999	40808,905	33160,413	23513,000	20404,453	16580,206	11756,500	10202,226	8290,103
VI_6	4	0,01	0,005	0,0025	47709,244	29602,796	24502,417	23854,622	14801,398	12251,209	11927,311	7400,699	6125,604
VI_7	4,84	0,01	0,005	0,0025	47336,317	35002,693	28663,574	23668,158	17501,347	14331,787	11834,079	8750,673	7165,893
VI_8	4,84	0,01	0,005	0,0025	47336,317	35002,693	28663,574	23668,158	17501,347	14331,787	11834,079	8750,673	7165,893
COME_1	7,29	0,01	0,005	0,0025	45833,134	46727,055	37675,792	22916,567	23363,527	18837,896	11458,284	11681,764	9418,948
COME_2	10,89	0,01	0,005	0,0025	44904,583	64774,047	51854,034	22452,291	32387,024	25927,017	11226,146	16193,512	12963,508
COME_3	10,89	0,01	0,005	0,0025	44904,583	64774,047	51854,034	22452,291	32387,024	25927,017	11226,146	16193,512	12963,508
COME_4	7,29	0,01	0,005	0,0025	45833,134	46727,055	37675,792	22916,567	23363,527	18837,896	11458,284	11681,764	9418,948
COME_5	7,29	0,01	0,005	0,0025	45833,134	46727,055	37675,792	22916,567	23363,527	18837,896	11458,284	11681,764	9418,948
COME_6	10,89	0,01	0,005	0,0025	44904,583	64774,047	51854,034	22452,291	32387,024	25927,017	11226,146	16193,512	12963,508
COME_7	10,89	0,01	0,005	0,0025	44904,583	64774,047	51854,034	22452,291	32387,024	25927,017	11226,146	16193,512	12963,508
COME_8	7,29	0,01	0,005	0,0025	45833,134	46727,055	37675,792	22916,567	23363,527	18837,896	11458,284	11681,764	9418,948
COME_9	7,29	0,01	0,005	0,0025	45833,134	46727,055	37675,792	22916,567	23363,527	18837,896	11458,284	11681,764	9418,948
COME_10	10,89	0,01	0,005	0,0025	44904,583	64774,047	51854,034	22452,291	32387,024	25927,017	11226,146	16193,512	12963,508
COME_11	8,41	0,01	0,005	0,0025	45506,111	52531,068	42213,733	22753,056	26265,534	21106,866	11376,528	13132,767	10553,433
COME_12	10,89	0,01	0,005	0,0025	44904,583	64774,047	51854,034	22452,291	32387,024	25927,017	11226,146	16193,512	12963,508
COME_13	7,29	0,01	0,005	0,0025	45833,134	46727,055	37675,792	22916,567	23363,527	18837,896	11458,284	11681,764	9418,948
COME_14	5,29	0,01	0,005	0,0025	46572,565	35838,921	29225,789	23286,283	17919,460	14612,894	11643,141	8959,730	7306,447
COME_15	4,41	0,01	0,005	0,0025	47006,374	30792,338	25340,048	23503,187	15396,169	12670,024	11751,594	7698,084	6335,012
COME_16	4,41	0,01	0,005	0,0025	47006,374	30792,338	25340,048	23503,187	15396,169	12670,024	11751,594	7698,084	6335,012
COME_17	3,61	0,01	0,005	0,0025	47505,335	26037,492	21698,629	23752,667	13018,746	10849,315	11876,334	6509,373	5424,657
COME_18	3,61	0,01	0,005	0,0025	47505,335	26037,492	21698,629	23752,667	13018,746	10849,315	11876,334	6509,373	5424,657

Fuente: Elaboración propia.

qadm:30ton/m ²					Resorte central			Resorte lateral			Resorte esquinero		
Cimentación	Atotal(m2)	Ar_centrl(m ²)	Ar_late(m ²)	Ar_esqui(m ²)	kz(kgf/m)	kyy(kgf·m)/rad	kxx(kgf·m)/rad	kz(kgf/m)	kyy(kgf·m)/rad	kxx(kgf·m)/rad	kz(kgf/m)	kyy(kgf·m)/rad	kxx(kgf·m)/rad
CL_1	4	0,01	0,005	0,0025	128377,096	76233,624	63099,042	64188,548	38116,812	31549,521	32094,274	19058,406	15774,761
QUIM_3	2,56	0,01	0,005	0,0025	132930,906	54654,875	46879,240	66465,453	27327,437	23439,620	33232,726	13663,719	11719,810
QUIM_4	2,56	0,01	0,005	0,0025	132930,906	54654,875	46879,240	66465,453	27327,437	23439,620	33232,726	13663,719	11719,810
COMPU_1	6,25	0,01	0,005	0,0025	128106,515	126512,340	102702,289	64053,257	63256,170	51351,144	32026,629	31628,085	25675,572
COMPU_2	12,25	0,01	0,005	0,0025	125593,304	239985,260	189125,818	62796,652	119992,630	94562,909	31398,326	59996,315	47281,455
COMPU_3	12,25	0,01	0,005	0,0025	125593,304	239985,260	189125,818	62796,652	119992,630	94562,909	31398,326	59996,315	47281,455
COMPU_4	12,25	0,01	0,005	0,0025	125593,304	239985,260	189125,818	62796,652	119992,630	94562,909	31398,326	59996,315	47281,455
BIB_1	1,21	0,01	0,005	0,0025	139436,829	28498,326	27064,515	69718,414	14249,163	13532,258	34859,207	7124,582	6766,129
BIB_2	3,61	0,01	0,005	0,0025	130216,725	72565,214	60473,016	65108,363	36282,607	30236,508	32554,181	18141,304	15118,254
BIB_3	3,61	0,01	0,005	0,0025	130216,725	72565,214	60473,016	65108,363	36282,607	30236,508	32554,181	18141,304	15118,254
BIB_4	3,61	0,01	0,005	0,0025	130216,725	72565,214	60473,016	65108,363	36282,607	30236,508	32554,181	18141,304	15118,254
BIB_5	1,21	0,01	0,005	0,0025	139436,829	28498,326	27064,515	69718,414	14249,163	13532,258	34859,207	7124,582	6766,129
LIMO_1	5,29	0,01	0,005	0,0025	128809,138	108970,797	89330,072	64404,569	54485,398	44665,036	32202,284	27242,699	22332,518
LIMO_2	6,25	0,01	0,005	0,0025	127998,992	126032,599	102312,836	63999,496	63016,299	51156,418	31999,748	31508,150	25578,209
LIMO_3	6,25	0,01	0,005	0,0025	127998,992	126032,599	102312,836	63999,496	63016,299	51156,418	31999,748	31508,150	25578,209
LIMO_4	6,25	0,01	0,005	0,0025	127998,992	126032,599	102312,836	63999,496	63016,299	51156,418	31999,748	31508,150	25578,209
LIMO_5	2,25	0,01	0,005	0,0025	134316,983	52072,918	46518,948	67158,491	26036,459	23259,474	33579,246	13018,229	11629,737
LIMO_6	7,29	0,01	0,005	0,0025	126522,722	140350,670	113099,163	63261,361	70175,335	56549,581	31630,681	35087,667	28274,791
LIMO_7	5,29	0,01	0,005	0,0025	128230,272	106821,928	87568,512	64115,136	53410,964	43784,256	32057,568	26705,482	21892,128
VI_1	3,24	0,01	0,005	0,0025	131365,314	67132,806	56397,091	65682,657	33566,403	28198,546	32841,328	16783,202	14099,273
VI_2	2,56	0,01	0,005	0,0025	132940,917	54673,624	46895,322	66470,459	27336,812	23447,661	33235,229	13668,406	11723,830
VI_3	4	0,01	0,005	0,0025	130116,119	80734,898	66824,775	65058,060	40367,449	33412,387	32529,030	20183,725	16706,194
VI_4	3,24	0,01	0,005	0,0025	131365,314	67132,806	56397,091	65682,657	33566,403	28198,546	32841,328	16783,202	14099,273
VI_5	5,76	0,01	0,005	0,0025	128252,726	111297,014	90437,489	64126,363	55648,507	45218,745	32063,181	27824,254	22609,372
VI_6	4	0,01	0,005	0,0025	130116,119	80734,898	66824,775	65058,060	40367,449	33412,387	32529,030	20183,725	16706,194
VI_7	4,84	0,01	0,005	0,0025	129099,045	95461,890	78173,383	64549,523	47730,945	39086,692	32274,761	23865,473	19543,346
VI_8	4,84	0,01	0,005	0,0025	129099,045	95461,890	78173,383	64549,523	47730,945	39086,692	32274,761	23865,473	19543,346
COME_1	2,25	0,01	0,005	0,0025	133158,599	47695,638	41464,571	66579,299	23847,819	20732,285	33289,650	11923,910	10366,143
COME_2	2,89	0,01	0,005	0,0025	131173,594	58896,943	49950,813	65586,797	29448,472	24975,407	32793,398	14724,236	12487,703
COME_3	2,89	0,01	0,005	0,0025	131173,594	58896,943	49950,813	65586,797	29448,472	24975,407	32793,398	14724,236	12487,703
COME_4	2,25	0,01	0,005	0,0025	133158,599	47695,638	41464,571	66579,299	23847,819	20732,285	33289,650	11923,910	10366,143
COME_5	2,25	0,01	0,005	0,0025	133158,599	47695,638	41464,571	66579,299	23847,819	20732,285	33289,650	11923,910	10366,143
COME_6	2,89	0,01	0,005	0,0025	131173,594	58896,943	49950,813	65586,797	29448,472	24975,407	32793,398	14724,236	12487,703
COME_7	2,89	0,01	0,005	0,0025	131173,594	58896,943	49950,813	65586,797	29448,472	24975,407	32793,398	14724,236	12487,703
COME_8	2,25	0,01	0,005	0,0025	133158,599	47695,638	41464,571	66579,299	23847,819	20732,285	33289,650	11923,910	10366,143
COME_9	2,25	0,01	0,005	0,0025	133158,599	47695,638	41464,571	66579,299	23847,819	20732,285	33289,650	11923,910	10366,143
COME_10	2,89	0,01	0,005	0,0025	131173,594	58896,943	49950,813	65586,797	29448,472	24975,407	32793,398	14724,236	12487,703
COME_11	2,89	0,01	0,005	0,0025	131173,594	58896,943	49950,813	65586,797	29448,472	24975,407	32793,398	14724,236	12487,703
COME_12	2,89	0,01	0,005	0,0025	131173,594	58896,943	49950,813	65586,797	29448,472	24975,407	32793,398	14724,236	12487,703
COME_13	2,25	0,01	0,005	0,0025	133158,599	47695,638	41464,571	66579,299	23847,819	20732,285	33289,650	11923,910	10366,143
COME_14	5,29	0,01	0,005	0,0025	127016,087	97742,511	79706,697	63508,044	48871,256	39853,348	31754,022	24435,628	19926,674
COME_15	4,41	0,01	0,005	0,0025	128199,202	83979,103	69109,222	64099,601	41989,551	34554,611	32049,801	20994,776	17277,306
COME_16	4,41	0,01	0,005	0,0025	128199,202	83979,103	69109,222	64099,601	41989,551	34554,611	32049,801	20994,776	17277,306
COME_17	3,61	0,01	0,005	0,0025	129560,004	71011,342	59178,079	64780,002	35505,671	29589,040	32390,001	17752,835	14794,520
COME_18	3,61	0,01	0,005	0,0025	129560,004	71011,342	59178,079	64780,002	35505,671	29589,040	32390,001	17752,835	14794,520

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 4

Cargas SU. estáticas_suelo 10 Ton/m ²								
Cimentación	Q _{min} (kgf/cm ²) en X	Q _{max} (kgf/cm ²) en X	Q _{min} (kgf/cm ²) en Y	Q _{max} (kgf/cm ²) en Y	Q _{min} (kgf/m ²) en X	Q _{max} (kgf/m ²) en X	Q _{min} (kgf/m ²) en Y	Q _{max} (kgf/m ²) en Y
CL_1	0,882	0,885	0,769	0,998	8820,092	8847,682	7686,498	9981,275
QUIM_3	0,803	0,827	0,748	0,882	8026,408	8265,580	7476,399	8815,589
QUIM_4	0,708	0,743	0,661	0,790	7081,134	7429,082	6614,655	7895,562
COMPU_1	0,858	0,866	0,807	0,916	8575,406	8662,280	8073,680	9164,005
COMPU_2	0,836	0,842	0,838	0,840	8363,554	8421,915	8380,803	8404,666
COMPU_3	0,792	0,804	0,789	0,807	7924,409	8039,211	7894,328	8069,291
COMPU_4	0,819	0,852	0,821	0,850	8187,471	8523,746	8213,524	8497,693
BIB_1	0,703	0,797	0,708	0,791	7026,256	7968,193	7081,021	7913,428
BIB_2	0,752	0,981	0,866	0,867	7516,421	9811,791	8659,612	8668,600
BIB_3	0,832	0,874	0,853	0,853	8316,256	8743,990	8525,712	8534,534
BIB_4	0,691	0,898	0,793	0,797	6912,668	8982,447	7929,856	7965,259
BIB_5	0,700	0,792	0,710	0,782	7001,643	7923,704	7102,997	7822,350
LIMO_1	0,763	0,854	0,808	0,809	7630,264	8536,185	8075,374	8091,075
LIMO_2	0,781	0,862	0,819	0,825	7813,485	8621,499	8186,348	8248,637
LIMO_3	0,775	0,881	0,827	0,830	7752,212	8814,457	8265,414	8301,255
LIMO_4	0,782	0,888	0,834	0,836	7820,785	8880,051	8337,768	8363,068
LIMO_5	0,816	0,863	0,809	0,870	8155,119	8633,264	8088,905	8699,478
LIMO_6	0,845	0,847	0,811	0,881	8445,723	8472,472	8105,597	8812,598
LIMO_7	0,758	0,763	0,704	0,817	7579,459	7631,131	7039,714	8170,875
VI_1	0,708	0,726	0,641	0,792	7076,163	7261,615	6414,733	7923,045
VI_2	0,706	0,751	0,691	0,767	7060,905	7514,588	6908,282	7667,212
VI_3	0,606	0,819	0,651	0,774	6056,695	8191,645	6512,890	7735,450
VI_4	0,525	0,637	0,523	0,639	5249,529	6372,595	5231,473	6390,650
VI_5	0,158	0,188	0,149	0,197	1583,444	1876,924	1485,618	1974,750
VI_6	0,453	0,500	0,453	0,500	4532,235	4999,035	4526,588	5004,683
VI_7	0,284	0,336	0,265	0,355	2840,294	3362,251	2653,172	3549,374
VI_8	0,168	0,200	0,163	0,205	1679,095	2001,161	1630,094	2050,162
COME_1	0,798	0,876	0,804	0,870	7979,673	8761,688	8042,273	8699,088
COME_2	0,893	0,899	0,861	0,931	8934,324	8985,790	8606,166	9313,948
COME_3	0,840	0,877	0,834	0,884	8397,137	8774,321	8336,062	8835,396
COME_4	0,808	0,838	0,802	0,844	8079,463	8378,729	8019,299	8438,893
COME_5	0,695	1,048	0,751	0,992	6948,453	10480,512	7513,501	9915,464
COME_6	0,859	0,931	0,883	0,907	8588,475	9311,350	8830,514	9069,312
COME_7	0,805	0,947	0,825	0,927	8047,666	9472,349	8249,788	9270,227
COME_8	0,688	1,064	0,727	1,025	6883,239	10639,861	7273,499	10249,601
COME_9	0,663	1,020	0,680	1,002	6627,965	10195,050	6802,198	10020,817
COME_10	0,856	0,868	0,851	0,873	8563,040	8680,396	8512,767	8730,669
COME_11	0,803	0,927	0,783	0,948	8031,258	9273,056	7826,298	9478,016
COME_12	0,774	0,892	0,802	0,864	7739,026	8922,511	8023,616	8637,921
COME_13	0,637	1,022	0,710	0,949	6369,943	10217,753	7099,579	9488,117
COME_14	0,291	0,308	-0,035	0,634	2913,645	3075,641	-354,375	6343,661
COME_15	0,356	0,374	0,020	0,710	3556,382	3741,818	202,459	7095,741
COME_16	0,364	0,374	0,010	0,728	3636,590	3736,635	97,704	7275,521
COME_17	0,428	0,453	0,027	0,854	4282,685	4526,971	266,053	8543,604
COME_18	0,372	0,425	0,330	0,467	3721,383	4254,096	3301,024	4674,455

Fuente: Elaboración propia.

Cargas SU.estáticas __suelo 30 Ton/m ²								
Cimentación	Q _{min} (kgf/cm ²) en X	Q _{max} (kgf/cm ²) en X	Q _{min} (kgf/cm ²) en Y	Q _{max} (kgf/cm ²) en Y	Q _{min} (kgf/m ²) en X	Q _{max} (kgf/m ²) en X	Q _{min} (kgf/m ²) en Y	Q _{max} (kgf/m ²) en Y
CL_1	2,854	2,870	2,193	3,531	28541,340	28702,245	21930,225	35313,360
QUIM_3	3,163	3,354	2,723	3,794	31627,287	33540,666	27227,219	37940,734
QUIM_4	2,763	3,041	2,390	3,414	27628,642	30412,226	23896,806	34144,062
COMPU_1	3,017	3,075	2,684	3,408	30173,812	30751,064	26840,013	34084,864
COMPU_2	3,055	3,096	3,067	3,084	30550,394	30959,785	30671,392	30838,788
COMPU_3	2,885	2,965	2,864	2,986	28846,598	29651,921	28635,586	29862,933
COMPU_4	2,944	3,180	2,962	3,162	29439,577	31798,507	29622,339	31615,746
BIB_1	2,405	3,060	2,443	3,022	24047,630	30601,560	24428,682	30220,508
BIB_2	2,438	4,133	3,282	3,289	24380,866	41331,937	32823,213	32889,590
BIB_3	3,077	3,393	3,232	3,238	30768,920	33927,689	32315,729	32380,881
BIB_4	2,250	3,778	3,001	3,027	22496,523	37781,626	30008,350	30269,799
BIB_5	2,399	3,041	2,470	2,970	23990,856	30406,483	24696,070	29701,269
LIMO_1	2,989	3,762	3,369	3,382	29888,772	37619,141	33686,964	33820,949
LIMO_2	2,636	3,173	2,884	2,925	26359,410	31728,398	28836,959	29250,849
LIMO_3	2,575	3,281	2,916	2,940	25747,481	32805,754	29157,539	29395,696
LIMO_4	2,599	3,303	2,943	2,960	25994,481	33032,956	29429,665	29597,772
LIMO_5	2,965	3,310	2,917	3,358	29647,996	33103,249	29169,507	33581,738
LIMO_6	3,249	3,270	2,992	3,527	32493,633	32695,956	29921,007	35268,582
LIMO_7	3,154	3,198	2,693	3,658	31537,754	31978,677	26932,025	36584,406
VI_1	0,708	0,726	0,641	0,792	7076,163	7261,615	6414,733	7923,045
VI_2	0,890	0,955	0,868	0,976	8900,571	9546,538	8683,262	9763,848
VI_3	0,606	0,819	0,651	0,774	6056,695	8191,645	6512,890	7735,450
VI_4	0,525	0,637	0,523	0,639	5249,529	6372,595	5231,473	6390,650
VI_5	0,158	0,188	0,149	0,197	1583,444	1876,924	1485,618	1974,750
VI_6	0,453	0,500	0,453	0,500	4532,235	4999,035	4526,588	5004,683
VI_7	0,284	0,336	0,265	0,355	2840,294	3362,251	2653,172	3549,374
VI_8	0,168	0,200	0,163	0,205	1679,095	2001,161	1630,094	2050,162
COME_1	2,484	2,940	2,521	2,904	24840,649	29401,360	25205,733	29036,276
COME_2	3,357	3,395	3,117	3,635	33574,751	33951,214	31174,385	36351,580
COME_3	3,097	3,373	3,053	3,418	30972,966	33731,940	30526,221	34178,686
COME_4	2,579	2,753	2,544	2,789	25789,613	27534,929	25438,733	27885,809
COME_5	1,794	3,853	2,123	3,524	17935,440	38534,409	21230,800	35239,049
COME_6	3,108	3,637	3,285	3,460	31080,960	36368,556	32851,393	34598,122
COME_7	2,780	3,822	2,928	3,674	27798,615	38219,710	29277,072	36741,253
COME_8	1,743	3,934	1,971	3,707	17433,111	39341,733	19709,111	37065,733
COME_9	1,685	3,765	1,787	3,664	16851,667	37654,902	17867,791	36638,778
COME_10	3,206	3,292	3,169	3,329	32058,858	32917,274	31691,127	33285,004
COME_11	2,210	2,826	2,108	2,928	22095,825	28260,327	21078,365	29277,787
COME_12	2,706	3,572	2,914	3,364	27063,318	35720,122	29144,999	33638,441
COME_13	1,565	3,809	1,991	3,384	15651,853	38092,280	19907,089	33837,044
COME_14	0,291	0,308	-0,035	0,634	2913,645	3075,641	-354,375	6343,661
COME_15	0,356	0,374	0,020	0,710	3556,382	3741,818	202,459	7095,741
COME_16	0,364	0,374	0,010	0,728	3636,590	3736,635	97,704	7275,521
COME_17	0,428	0,453	0,027	0,854	4282,685	4526,971	266,053	8543,604
COME_18	0,372	0,425	0,330	0,467	3721,383	4254,096	3301,024	4674,455

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 5

Cargas SU.Dinam_suelo 10 Ton/m ²								
Cimentación	Q _{min} (kgf/cm ²) en X	Q _{max} (kgf/cm ²) en X	Q _{min} (kgf/cm ²) en Y	Q _{max} (kgf/cm ²) en Y	Q _{min} (kgf/m ²) en X	Q _{max} (kgf/m ²) en X	Q _{min} (kgf/m ²) en Y	Q _{max} (kgf/m ²) en Y
CL_1	0,657	0,701	0,583	0,776	6571,086	7012,747	5827,497	7756,337
QUIM_3	0,666	0,790	0,503	0,953	6663,396	7899,622	5032,780	9530,238
QUIM_4	0,649	0,784	0,520	0,914	6494,200	7838,912	5195,248	9137,864
COMPU_1	0,840	0,939	0,800	0,978	8399,080	9386,408	8004,843	9780,645
COMPU_2	0,655	0,685	0,651	0,690	6551,189	6851,682	6506,471	6896,400
COMPU_3	0,616	0,646	0,606	0,655	6155,895	6459,973	6061,343	6554,525
COMPU_4	0,624	0,660	0,609	0,674	6238,014	6596,061	6091,947	6742,127
BIB_1	0,536	0,845	0,569	0,812	5364,904	8448,960	5693,249	8120,615
BIB_2	0,530	0,729	0,610	0,649	5303,746	7287,414	6103,779	6487,381
BIB_3	0,504	0,574	0,521	0,557	5039,485	5741,973	5211,566	5569,892
BIB_4	0,476	0,658	0,547	0,586	4758,390	6576,890	5471,736	5863,543
BIB_5	0,538	0,878	0,594	0,822	5377,731	8781,774	5941,217	8218,289
LIMO_1	0,586	0,662	0,606	0,642	5864,328	6620,446	6062,006	6422,767
LIMO_2	0,608	0,678	0,623	0,663	6078,076	6779,916	6231,965	6626,027
LIMO_3	0,608	0,707	0,639	0,677	6081,851	7074,599	6390,716	6765,734
LIMO_4	0,612	0,715	0,645	0,682	6123,346	7147,021	6449,909	6820,457
LIMO_5	0,658	0,836	0,660	0,834	6581,711	8364,096	6603,978	8341,830
LIMO_6	0,600	0,615	0,580	0,635	6003,772	6146,013	5798,263	6351,522
LIMO_7	0,603	0,632	0,574	0,661	6025,584	6318,345	5736,271	6607,658
VI_1	0,570	0,653	-0,170	1,393	5700,476	6526,073	-1699,544	13926,094
VI_2	0,743	0,905	0,009	1,640	7430,191	9053,525	86,580	16397,136
VI_3	0,730	0,953	0,207	1,476	7296,223	9533,773	2068,295	14761,700
VI_4	0,929	1,318	0,267	1,980	9285,694	13180,818	2665,417	19801,096
VI_5	0,246	0,303	-0,047	0,596	2458,590	3033,208	-472,447	5964,246
VI_6	0,529	0,686	-0,026	1,241	5293,043	6860,618	-255,825	12409,485
VI_7	0,590	0,750	0,174	1,166	5904,729	7495,180	1740,336	11659,573
VI_8	0,538	0,721	0,133	1,126	5379,682	7211,000	1328,865	11261,817
COME_1	0,561	0,643	0,559	0,646	5612,225	6432,143	5589,317	6455,051
COME_2	0,607	0,627	0,585	0,650	6068,105	6273,925	5845,739	6496,291
COME_3	0,576	0,619	0,577	0,618	5761,653	6189,365	5770,777	6180,240
COME_4	0,566	0,617	0,567	0,617	5664,319	6173,437	5666,142	6171,614
COME_5	0,403	0,824	0,387	0,841	4032,006	8244,559	3866,626	8409,939
COME_6	0,528	0,689	0,551	0,666	5275,657	6890,356	5509,536	6656,477
COME_7	0,491	0,702	0,529	0,664	4909,573	7020,640	5292,513	6637,700
COME_8	0,393	0,826	0,398	0,821	3925,953	8259,671	3976,546	8209,078
COME_9	0,437	0,758	0,340	0,855	4373,260	7575,053	3400,402	8547,910
COME_10	0,558	0,622	0,533	0,648	5582,108	6224,522	5330,469	6476,161
COME_11	0,534	0,698	0,502	0,729	5338,470	6978,070	5023,485	7293,054
COME_12	0,503	0,638	0,517	0,623	5030,251	6377,025	5173,130	6234,147
COME_13	0,420	0,758	0,401	0,778	4198,929	7584,553	4007,290	7776,191
COME_14	0,368	0,445	-0,099	0,912	3680,170	4450,934	-991,836	9122,940
COME_15	0,217	0,321	-0,276	0,813	2165,937	3206,689	-2760,632	8133,258
COME_16	0,220	0,319	-0,193	0,732	2196,892	3194,573	-1926,574	7318,039
COME_17	0,252	0,392	-0,252	0,897	2520,992	3923,867	-2523,093	8967,952
COME_18	0,530	0,607	0,141	0,995	5297,369	6070,293	1414,865	9952,797

Fuente: Elaboración propia.

Cargas SU.Dinam_suelo 30 Ton/m ²								
Cimentación	Q _{min} (kgf/cm ²) en X	Q _{max} (kgf/cm ²) en X	Q _{min} (kgf/cm ²) en Y	Q _{max} (kgf/cm ²) en Y	Q _{min} (kgf/m ²) en X	Q _{max} (kgf/m ²) en X	Q _{min} (kgf/m ²) en Y	Q _{max} (kgf/m ²) en Y
CL_1	2,072	2,329	1,638	2,763	20717,925	23293,695	16381,313	27630,308
QUIM_3	2,418	3,407	1,114	4,712	24181,133	34070,938	11136,201	47115,869
QUIM_4	2,329	3,405	1,290	4,444	23287,375	34045,070	12895,759	44436,687
COMPU_1	2,815	3,471	2,553	3,733	28150,280	34710,751	25530,705	37330,326
COMPU_2	2,350	2,561	2,319	2,592	23503,384	25611,300	23189,689	25924,995
COMPU_3	2,205	2,418	2,139	2,485	22048,824	24181,896	21385,553	24845,167
COMPU_4	2,226	2,477	2,123	2,580	22259,338	24770,997	21234,699	25795,636
BIB_1	1,444	3,590	1,673	3,362	14443,882	35902,515	16728,480	33617,917
BIB_2	1,655	3,120	2,246	2,529	16549,781	31198,966	22457,940	25290,808
BIB_3	1,785	2,304	1,912	2,177	17849,058	23036,858	19119,862	21766,055
BIB_4	1,478	2,821	2,005	2,294	14778,356	28207,788	20046,345	22939,799
BIB_5	1,396	3,765	1,788	3,372	13960,527	37645,606	17881,218	33724,914
LIMO_1	2,284	2,929	2,453	2,761	22840,940	29293,018	24527,765	27606,193
LIMO_2	2,039	2,505	2,141	2,403	20390,895	25054,391	21413,437	24031,849
LIMO_3	1,995	2,655	2,200	2,450	19951,833	26548,324	22004,140	24496,016
LIMO_4	2,005	2,685	2,222	2,468	20050,400	26852,384	22220,307	24682,477
LIMO_5	2,149	3,437	2,165	3,421	21491,964	34372,142	21652,871	34211,236
LIMO_6	2,287	2,395	2,132	2,550	22869,983	23945,855	21315,564	25500,274
LIMO_7	2,452	2,702	2,206	2,949	24523,822	27021,996	22055,064	29490,754
VI_1	0,570	0,653	-0,170	1,393	5700,476	6526,073	-1699,544	13926,094
VI_2	0,928	1,159	-0,118	2,204	9275,428	11586,775	-1180,612	22042,815
VI_3	0,730	0,953	0,207	1,476	7296,223	9533,773	2068,295	14761,700
VI_4	0,929	1,318	0,267	1,980	9285,694	13180,818	2665,417	19801,096
VI_5	0,246	0,303	-0,047	0,596	2458,590	3033,208	-472,447	5964,246
VI_6	0,529	0,686	-0,026	1,241	5293,043	6860,618	-255,825	12409,485
VI_7	0,590	0,750	0,174	1,166	5904,729	7495,180	1740,336	11659,573
VI_8	0,538	0,721	0,133	1,126	5379,682	7211,000	1328,865	11261,817
COME_1	1,712	2,190	1,699	2,204	17120,996	21902,756	16987,396	22036,356
COME_2	2,250	2,401	2,087	2,563	22500,654	24006,162	20874,121	25632,696
COME_3	2,095	2,408	2,102	2,401	20952,423	24080,996	21019,164	24014,255
COME_4	1,769	2,066	1,770	2,065	17692,578	20661,751	17703,209	20651,120
COME_5	0,760	3,217	0,664	3,314	7604,231	32171,840	6639,733	33136,338
COME_6	1,702	2,883	1,873	2,712	17016,279	28827,278	18727,030	27116,527
COME_7	1,476	3,020	1,756	2,740	14756,625	30198,400	17557,708	27397,317
COME_8	0,710	3,238	0,740	3,208	7103,591	32377,831	7398,649	32082,773
COME_9	1,002	2,869	0,435	3,437	10019,840	28692,693	4346,133	34366,400
COME_10	1,990	2,459	1,805	2,643	19895,146	24594,197	18054,490	26434,852
COME_11	1,385	2,199	1,229	2,355	13851,147	21990,410	12287,508	23554,049
COME_12	1,657	2,642	1,761	2,537	16566,651	26417,862	17611,759	25372,753
COME_13	0,922	2,896	0,810	3,008	9216,760	28961,720	8099,124	30079,356
COME_14	0,368	0,445	-0,099	0,912	3680,170	4450,934	-991,836	9122,940
COME_15	0,217	0,321	-0,276	0,813	2165,937	3206,689	-2760,632	8133,258
COME_16	0,220	0,319	-0,193	0,732	2196,892	3194,573	-1926,574	7318,039
COME_17	0,252	0,392	-0,252	0,897	2520,992	3923,867	-2523,093	8967,952
COME_18	0,530	0,607	0,141	0,995	5297,369	6070,293	1414,865	9952,797

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 6

Diseño por flexión en M↓

Datos para diseño:

Espeor	50	cm
Recubrimiento:	7,5	cm
Luz	3,7	m
d:	42,5	cm
b:	100	cm
Fy(grado 60):	4200	kg/cm ²
f'c:	245	kg/cm ²

Momento: **Mu:** 16844,32 kg·m
16844,32 kg·cm

Supongo un ϕ : ϕ : 0,9

Calculamos Rn: $Rn = \frac{Mu}{\phi \cdot b \cdot d^2}$
Rn: 10,3617501

Calculamos ρ : $\rho = \frac{0,85 \cdot f'c \cdot fy}{fy} (1 - \text{raiz}(1 - (2Rn/0,85 \cdot f'c)))$
 ρ : 0,00253

As: $\rho \cdot b \cdot d$
As: 10,75980122 cm²

Ahora comprobar el $\phi > 0,9$
a: $(As \cdot fy) / (0,85 \cdot f'c \cdot b)$
a: 2,170043944

Como el concreto es menor a 280 kg/cm²
 β : 0,85

Ahora: $a = \beta \cdot C$
Así C: 2,552992875

Y finalente: $C/d \leq 0,375$
C/d: 0,060070421 < 0,375 **Sección Controlada por la Tensión**

$As_{min} = 0,0018 \cdot b \cdot d = 7,65$
 $0,0014 \cdot b \cdot d = 5,95$

Por lo tanto el As a utilizar es: **As: 10,8 cm²**

Colocar una malla # **5 @ 35 cm**
As malla: 7,634543491 cm²

El acero xtra a colocar es: As: 3,1 cm²

Para el número de varillas:
As1 #3: 0,7125 cm²
As1 #4: 1,27 cm²
As1 #5: 1,98 cm²
As1 #6: 2,85 cm²
As1 #7: 3,88 cm²
As1 #8: 5,07 cm²

Varilla #		#Varillas	Separación cm
3	4,39	5	21
4	2,47	3	43
5	1,58	2	85
6	1,10	2	85
7	0,81	1	#[DIV]/0!
8	0,62	1	#[DIV]/0!

Cantidad de bastones por flexión que se requieren: 3 Varillas # 5 a cada 35 cm
Por metro de profundidad

Cantida de varilla por flexión:

Varilla #	Espaciamento @
Malla 5	35
Bastón 4	35

Diseño por flexión en M↑

Datos para diseño:

Espeor	50	cm
Recubrimiento:	7,5	cm
Luz	3,7	m
d:	42,5	cm
b:	100	cm
Fy(grado 60):	4200	kg/cm ²
f'c:	245	kg/cm ²

Momento: **Mu:** 6259 kg·m
6259 kg·cm

Supongo un ϕ : ϕ : 0,9

Calculamos Rn: $Rn = \frac{Mu}{\phi \cdot b \cdot d^2}$
Rn: 0,038502115

Calculamos ρ : $\rho = \frac{0,85 \cdot f'c \cdot fy}{fy} (1 - \text{raiz}(1 - (2Rn/0,85 \cdot f'c)))$
 ρ : 0,00001

As: $\rho \cdot b \cdot d$
As: 0,038964075 cm²

Ahora comprobar el $\phi > 0,9$
a: $(As \cdot fy) / (0,85 \cdot f'c \cdot b)$
a: 0,007858301

Como el concreto es menor a 280 kg/cm²
 β : 0,85

Ahora: $a = \beta \cdot C$
Así C: 0,00924506

Y finalente: $C/d \leq 0,375$
C/d: 0,000217531 < 0,375 **Sección Controlada por la Tensión**

$As_{min} = 0,0018 \cdot b \cdot d = 7,65$
 $0,0014 \cdot b \cdot d = 5,95$

Por lo tanto el As a utilizar es: **As: 7,65 cm²**

Colocar una malla # **5 @ 35 cm**
As malla: 7,634543491 cm²

El acero xtra a colocar es: As: 0,02 cm²

Para el número de varillas:
As1 #3: 0,7125 cm²
As1 #4: 1,27 cm²
As1 #5: 1,98 cm²
As1 #6: 2,85 cm²
As1 #7: 3,88 cm²
As1 #8: 5,07 cm²

Varilla #		#Varillas	Separación cm
3	0,02	1	#[DIV]/0!
4	0,01	1	#[DIV]/0!
5	0,01	1	#[DIV]/0!
6	0,01	1	#[DIV]/0!
7	0,00	1	#[DIV]/0!
8	0,00	1	#[DIV]/0!

Cantidad de bastones por flexión que se requieren: 0 Varillas # 0 a cada 0 cm
Por metro de profundidad

Cantida de varilla por flexión:

Varilla #	Espaciamento @
Malla 5	35
Bastón	

REVISIÓN DE CAPACIDAD CORTANTE

El Vu obtenido del modelo es:

58863,66 kg

Vn: $Acv(ac\sqrt{f_c} + \rho_n f_y)$

Cantidad de mallas por utilizar: 2 malla si $\begin{cases} Vu \geq 0,5 Acv\sqrt{f_c} \\ t \geq 20 \text{ cm} \end{cases}$

1 malla si $\begin{cases} Vu < 0,5 Acv\sqrt{f_c} \\ t < 20 \text{ cm} \end{cases}$
 # mallas: **2**

Separación:

t-2rec	cm	2 mallas
t/2	cm	1 malla
Sep:	35	cm

Varilla a usar (la de malla a flexión)

ACV: $t \cdot BW \text{ cm}^2$
Acv: 5000 cm²

OC: Luz/t $\begin{cases} < 1,5 \\ \geq 1,5 \end{cases}$ $\begin{matrix} oc= 0,80 \\ oc=0,53 \end{matrix}$
 ac: **0,53**

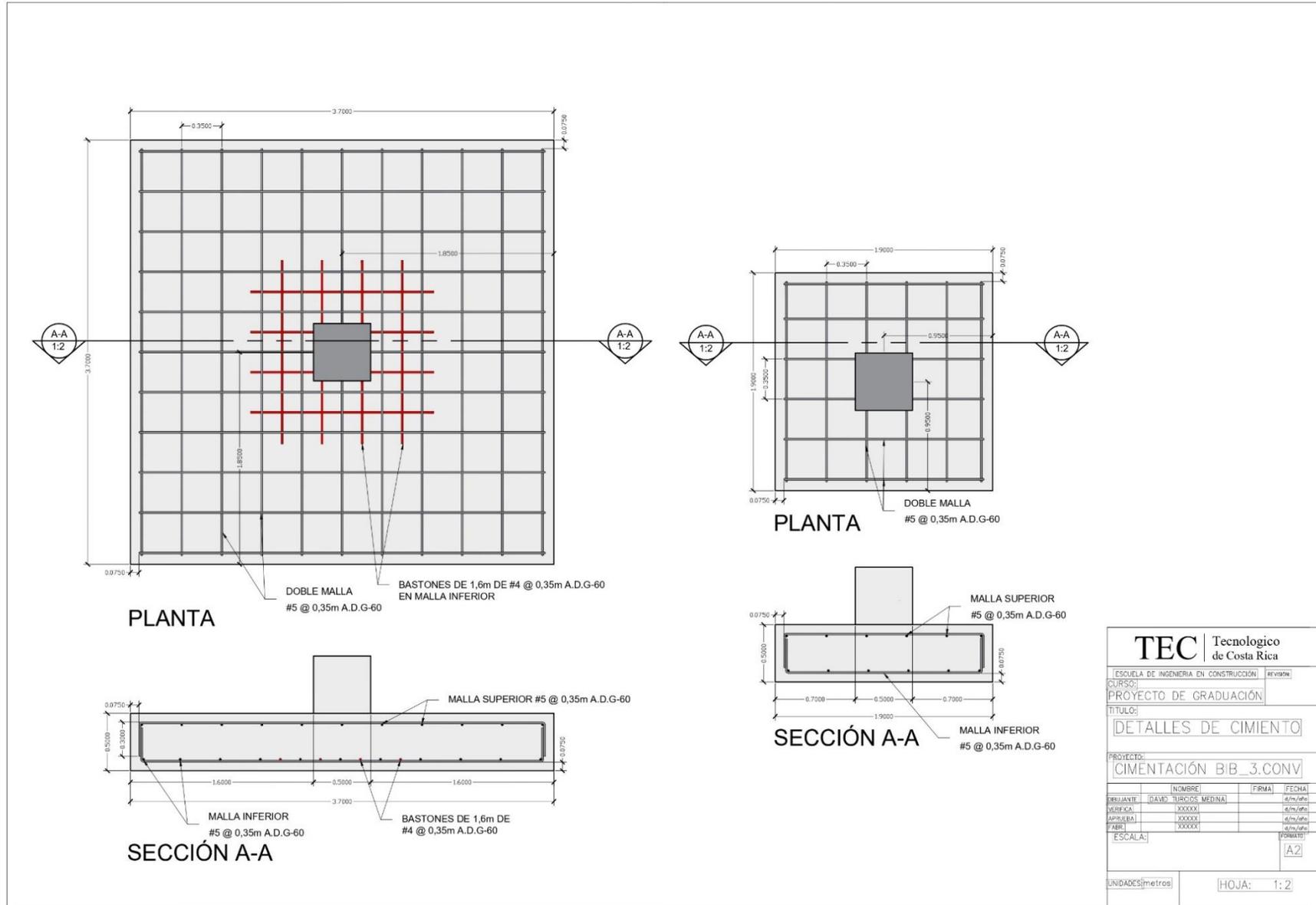
ρ_n : $Ramas(Av/(t \cdot sep))$
 ρ_n : 0,00323

Vn: **109341,670 kg**
 ϕ_v : 0,6
 $\phi_v \cdot Vn$: **65605,00187**

$\phi V_n > V_u$ **Cumple**

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 7



Fuente: Elaboración propia.

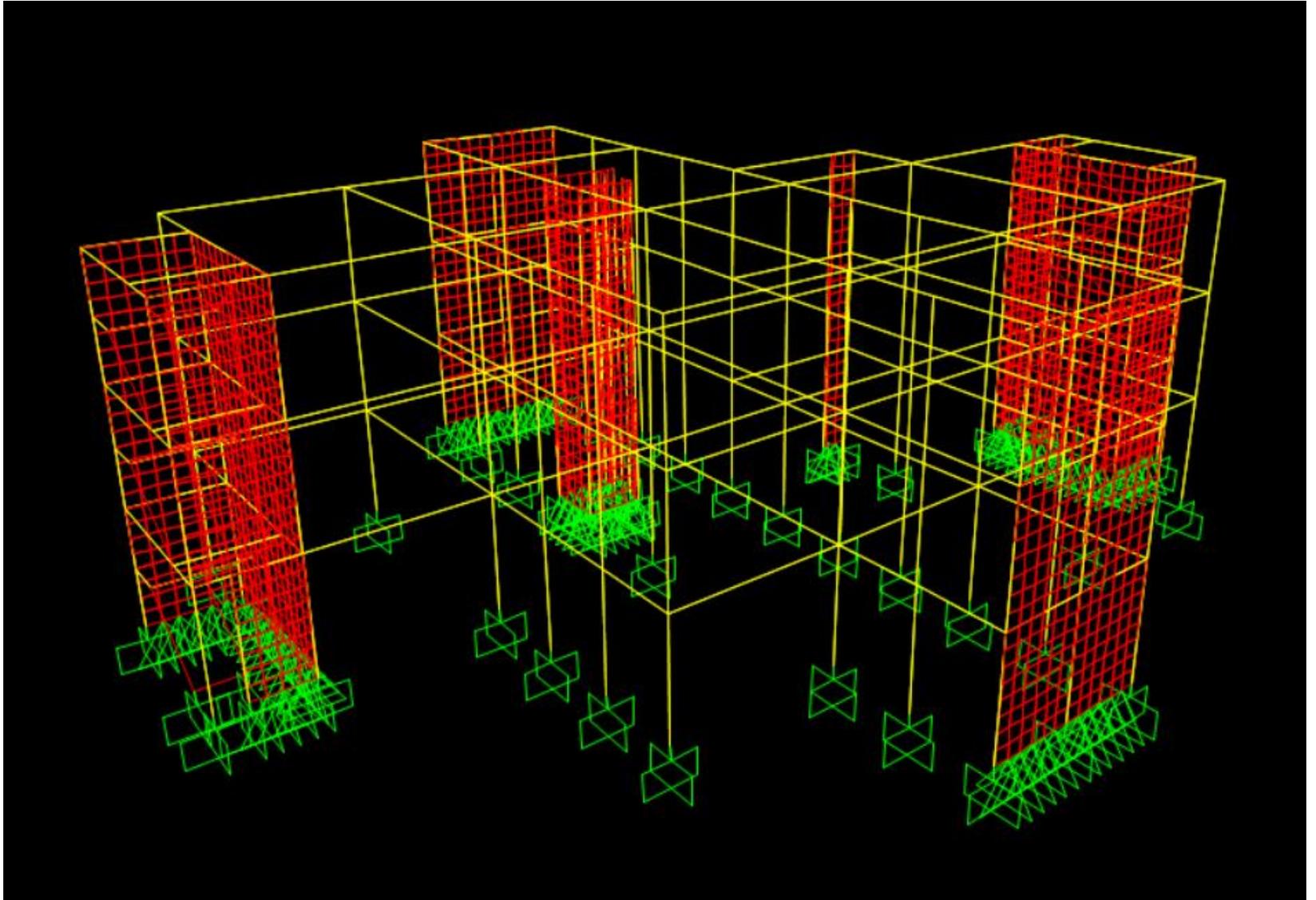
TEC Tecnológico de Costa Rica	
ESCUOLA DE INGENIERIA EN CONSTRUCCION	REVISION
CURSO: PROYECTO DE GRADUACION	
TITULO: DETALLES DE CIMENTO	
PROYECTO: CIMENTACION BIB_3.CONV	
NOMBRE	FIRMA
DAVID TURCIOS MEDINA	
VERIFICA	FECHA
XXXXX	4/11/2016
APROBADA	FECHA
XXXXX	4/11/2016
FABRI	FECHA
XXXXX	4/11/2016
ESCALA:	FORMATO:
	A2
UNIDADES: metros	HOJA: 1:2

Anexos

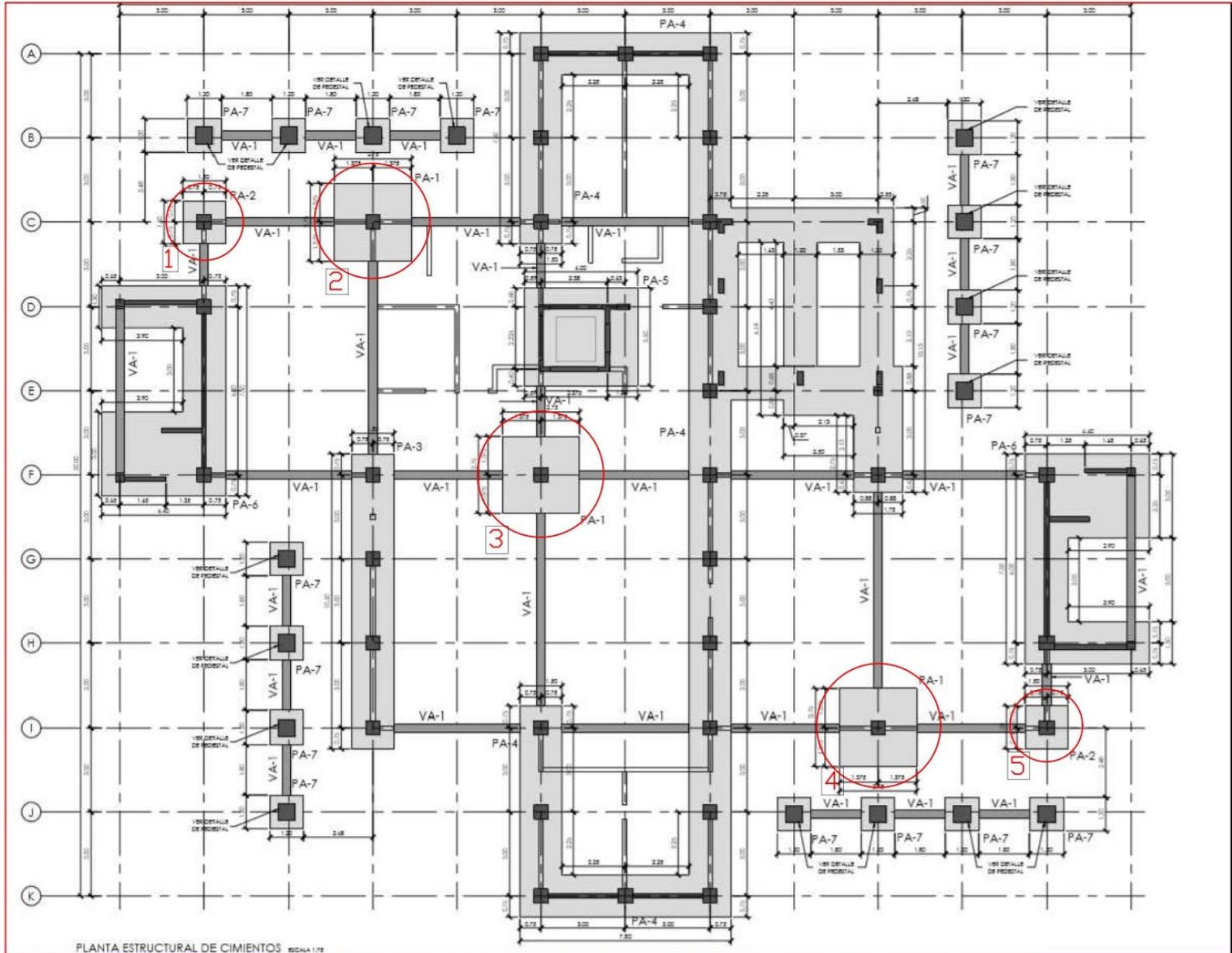
Los anexos que se presentan corresponden a:

1. Modelo en SAP 2000 del edificio de Biblioteca (BIB) y la distribución en planta de las cimentaciones.
2. Modelo en SAP 2000 del edificio de VIESA (VI) y la distribución en planta de las cimentaciones.
3. Modelo en SAP 2000 del edificio de Comedor (COME) y la distribución en planta de las cimentaciones.
4. Modelo en SAP 2000 del edificio de Ciencias del Lenguaje (CL) y la distribución en planta de las cimentaciones.
5. Modelo en SAP 2000 del edificio de Química (QUIM) y la distribución en planta de las cimentaciones.
6. Modelo en SAP 2000 del edificio de Escuela en Limoncito (LIMO) y la distribución en planta de las cimentaciones.
7. Modelo en SAP 2000 del edificio de Computación (COMPU) y la distribución en planta de las cimentaciones.
8. Porcentaje de cargas sociales.
9. Tabla de rendimientos de mano de obra.

Anexo 1

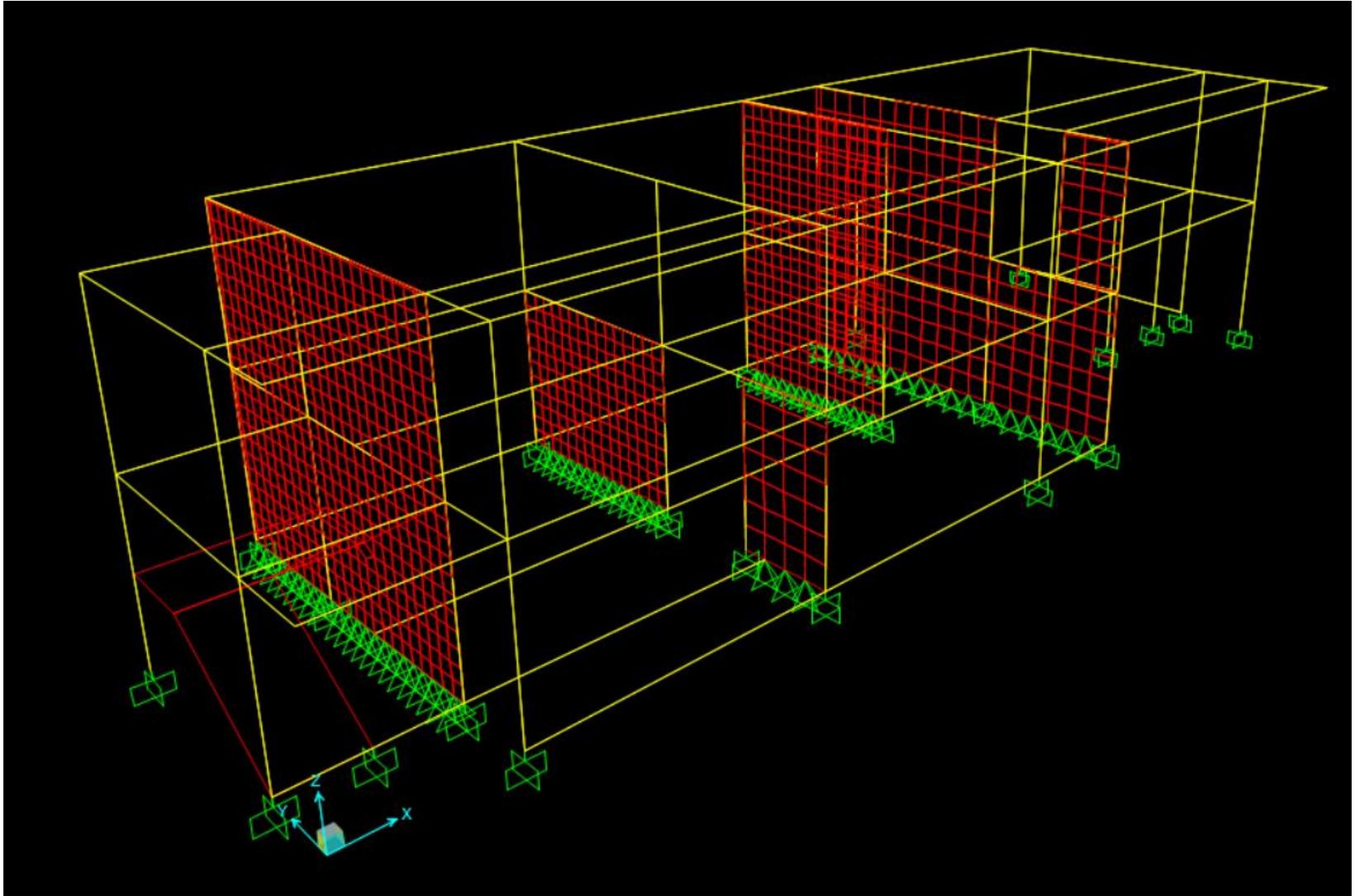


Fuente: (Peralta, Modelo SAP 2000 de Edificio).

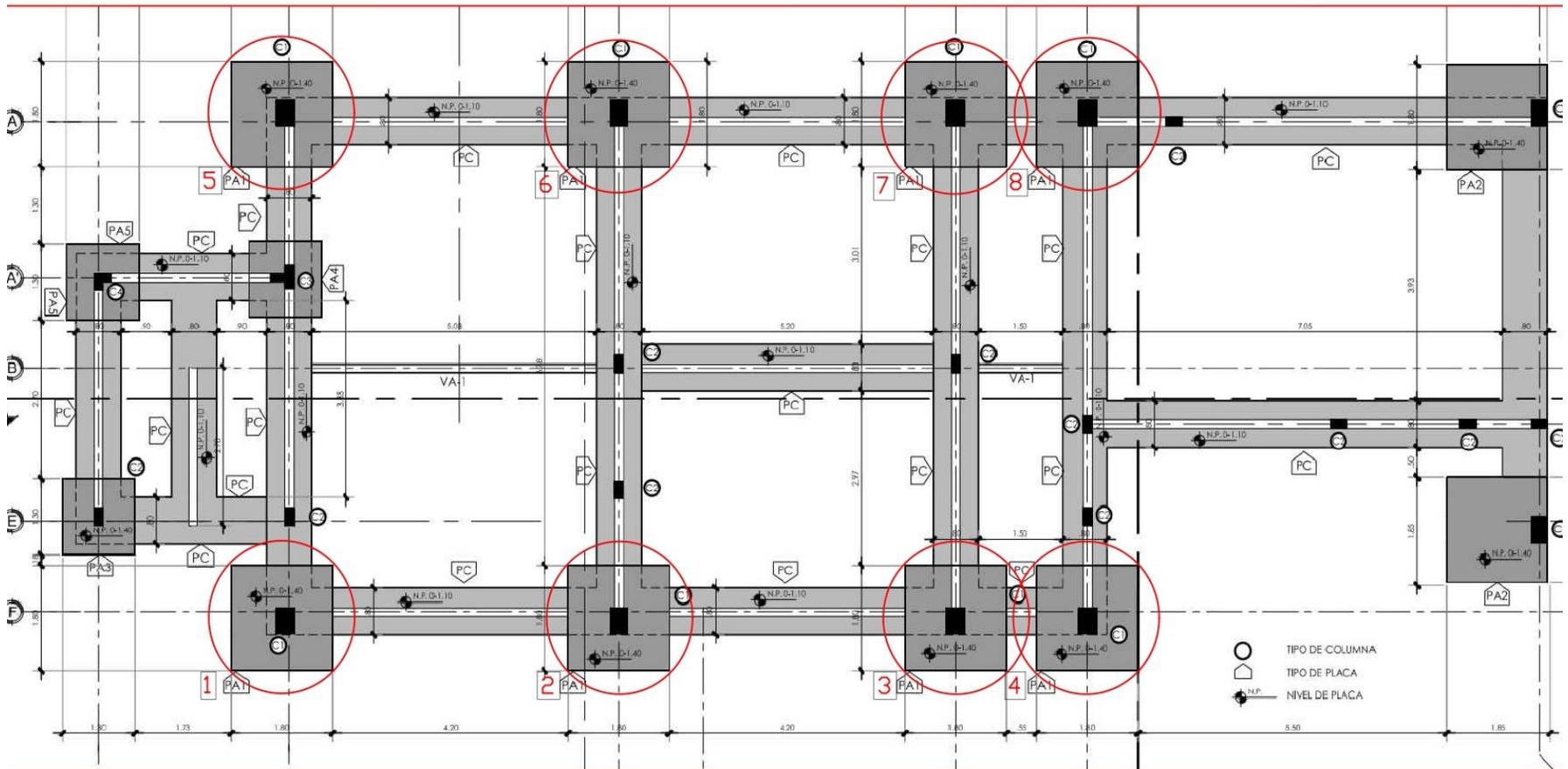


Fuente: (Peralta, Planos Constructivos de Edificio, 2020).

Anexo 2

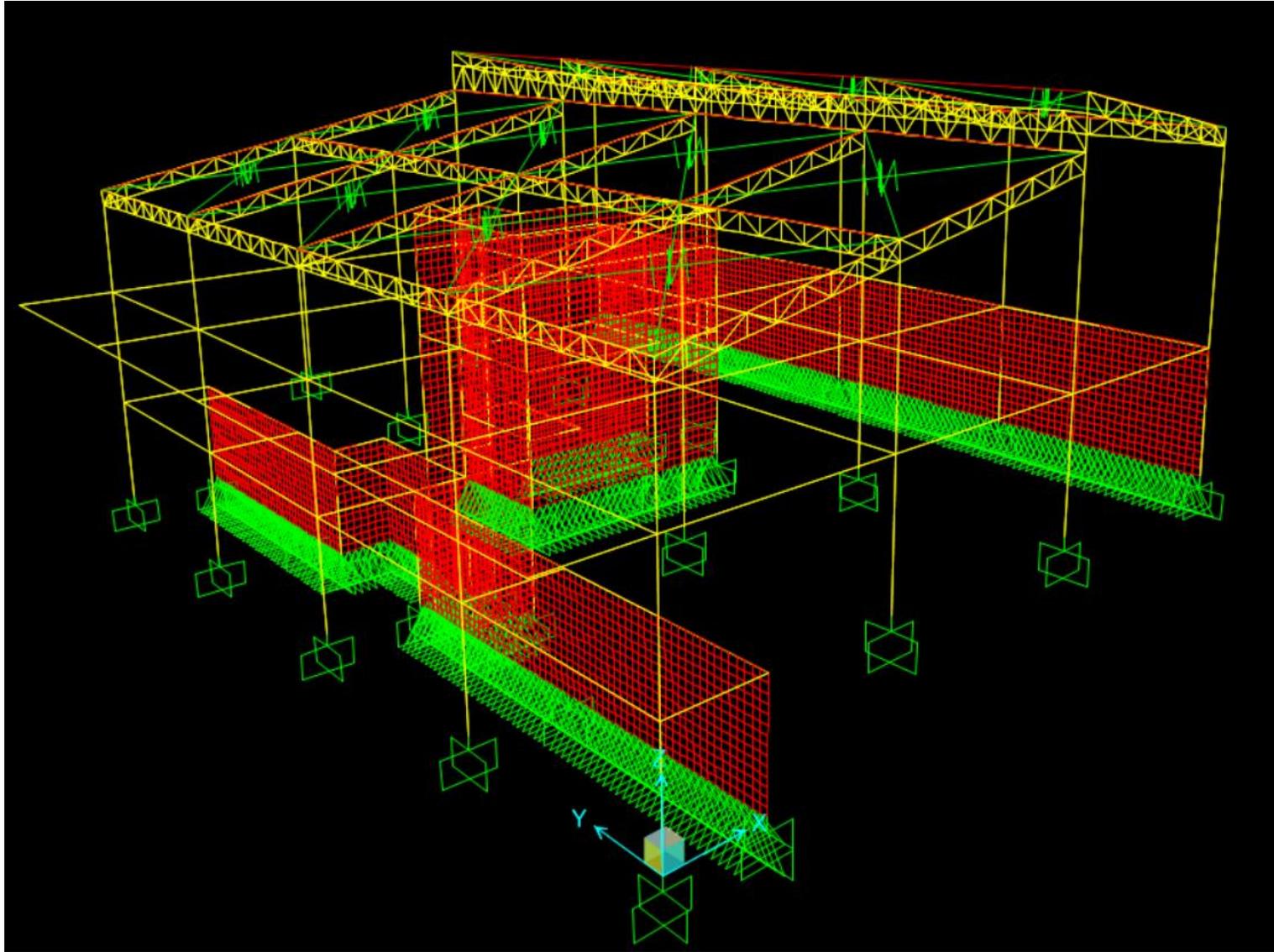


Fuente: (Peralta, Modelo SAP 2000 de Edificio).

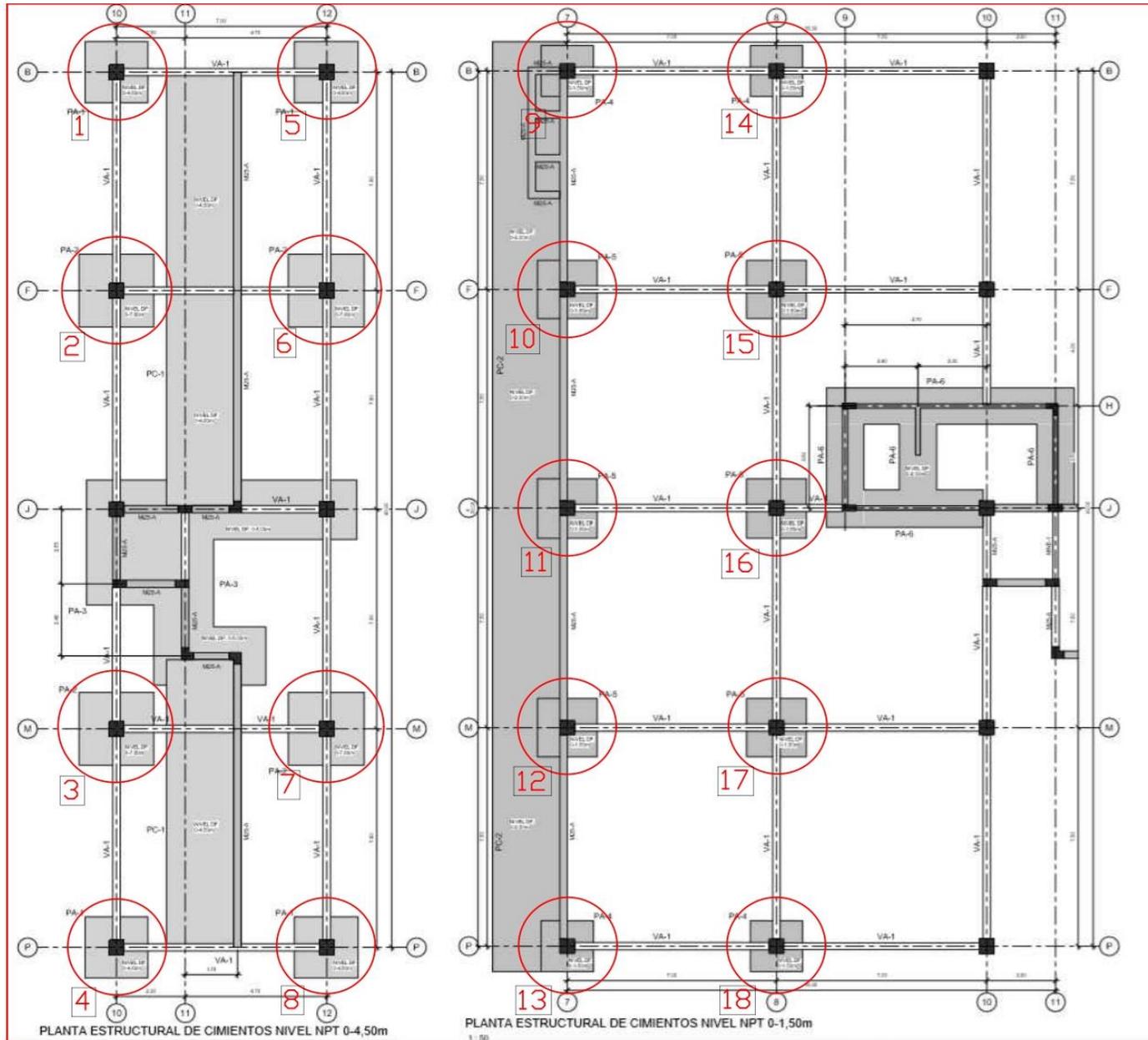


Fuente: (Peralta, Planos Constructivos de Edificio, 2020).

Anexo 3



Fuente: (Peralta, Modelo SAP 2000 de Edificio).

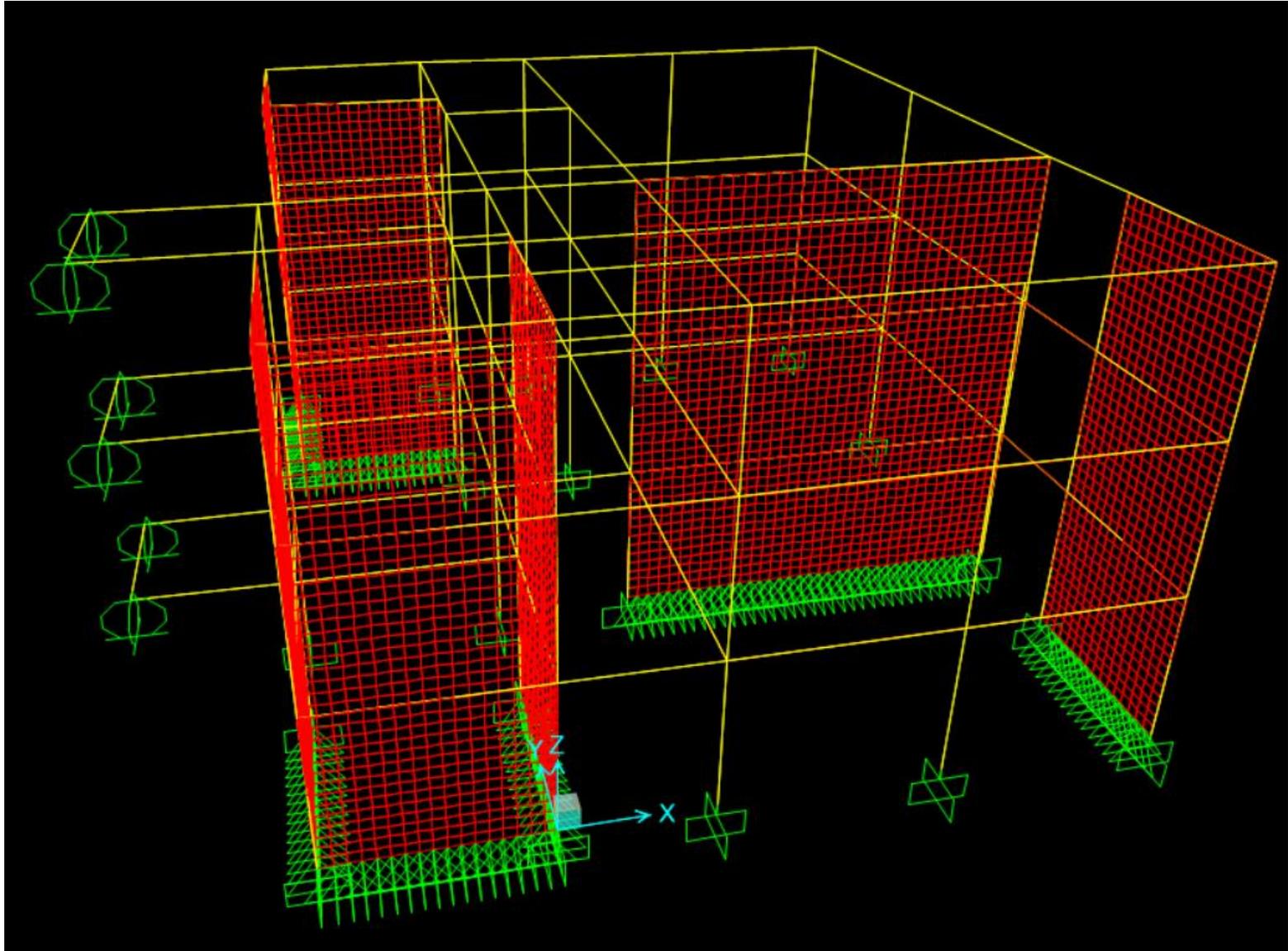


Fuente: (Peralta, Planos Constructivos de Edificio, 2020).

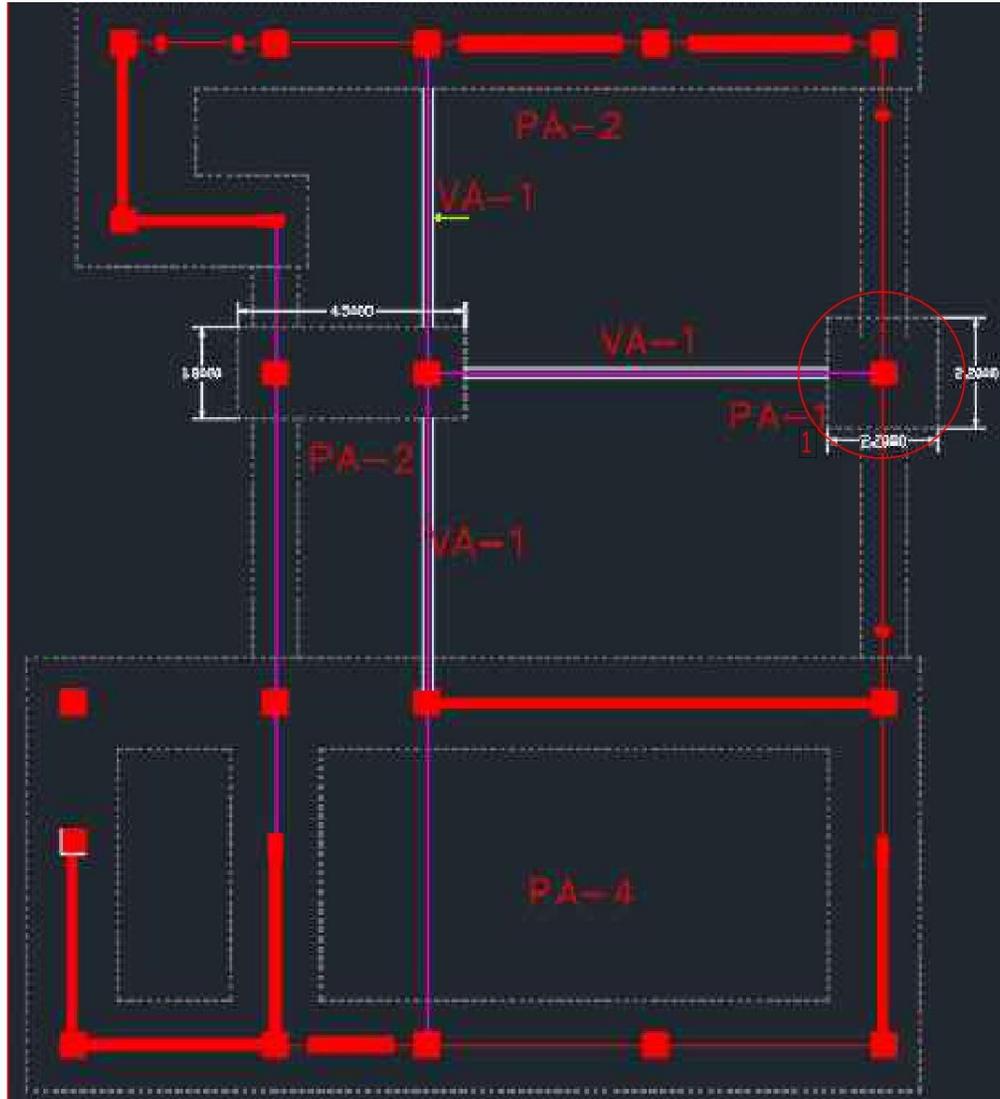
93

Comparación de diseño estructural para cimentaciones superficiales utilizando el método rígido convencional y el método Winkler por elementos finitos.

Anexo 4

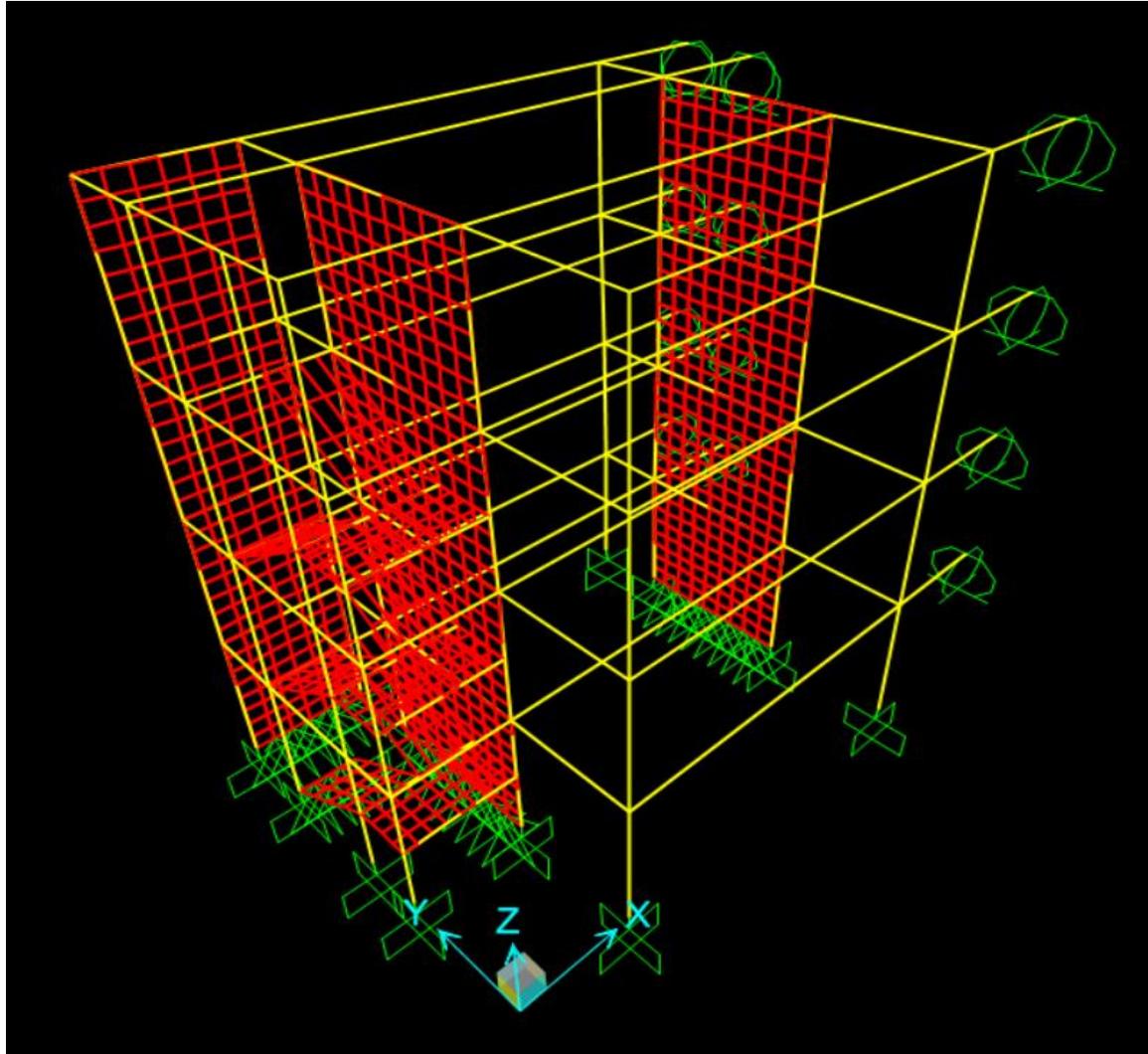


Fuente: (Peralta, Modelo SAP 2000 de Edificio).

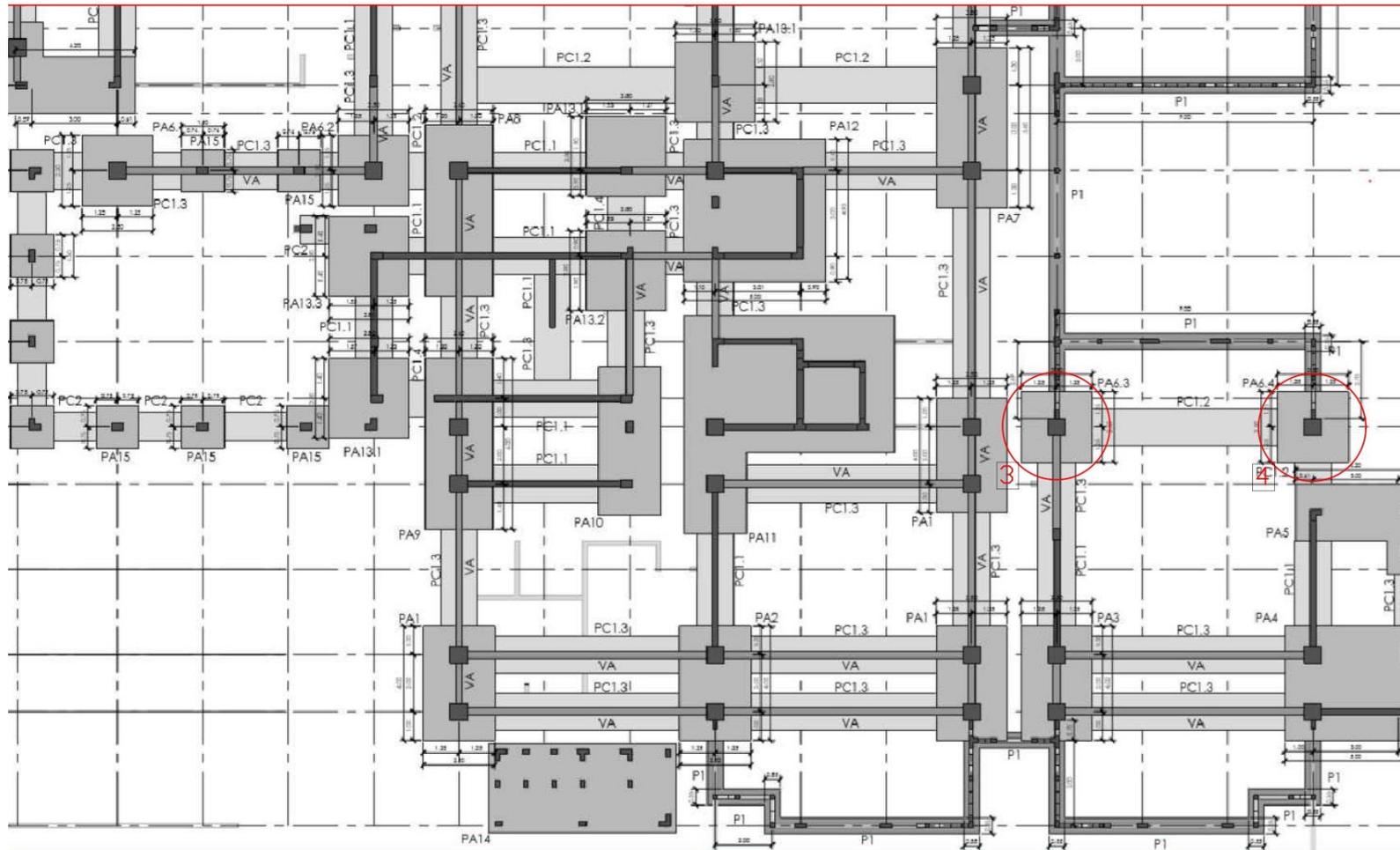


Fuente: (Peralta, Planos Constructivos de Edificio, 2020).

Anexo 5

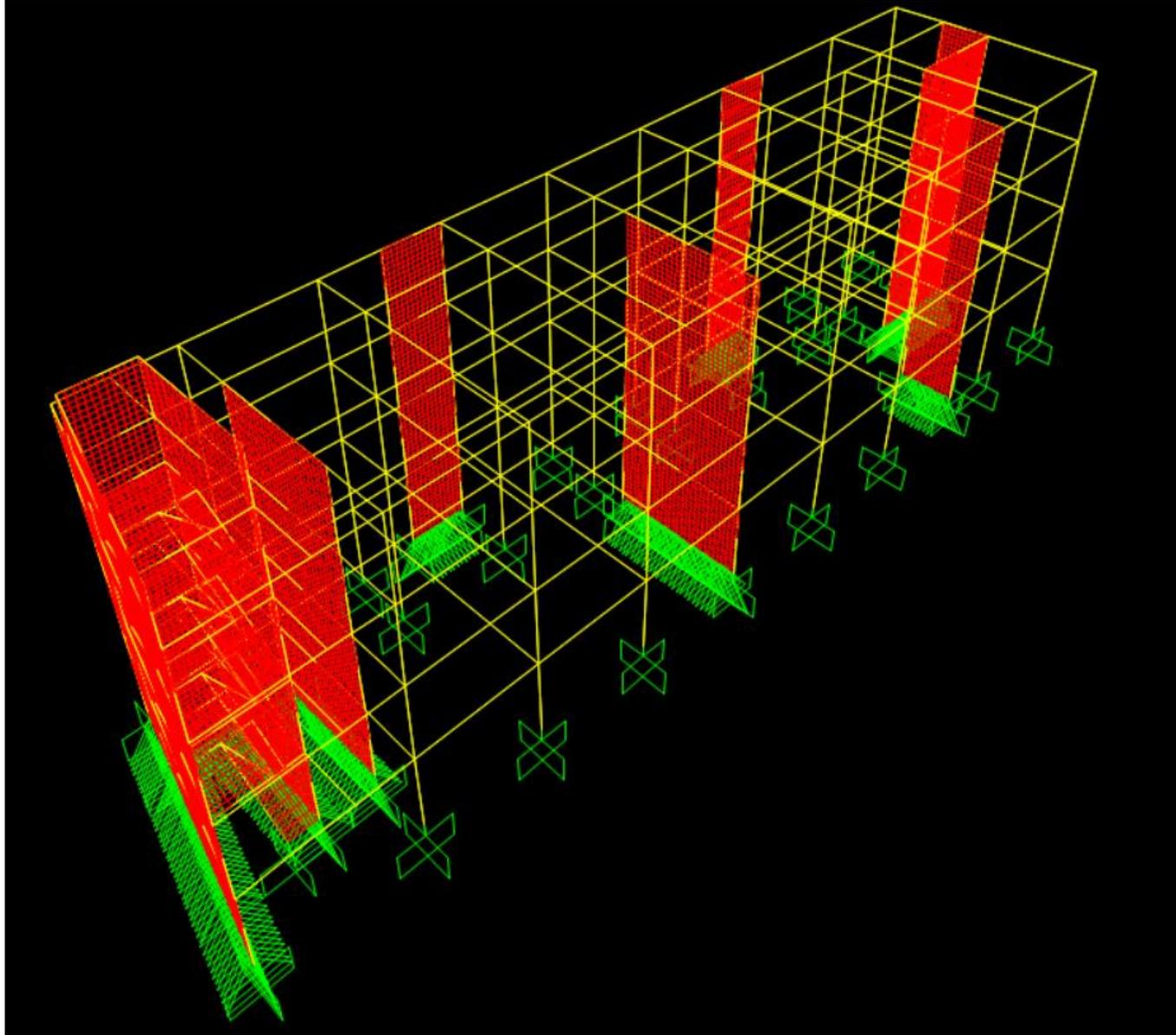


Fuente: (Peralta, Modelo SAP 2000 de Edificio).



Fuente: (Peralta, Planos Constructivos de Edificio, 2020).

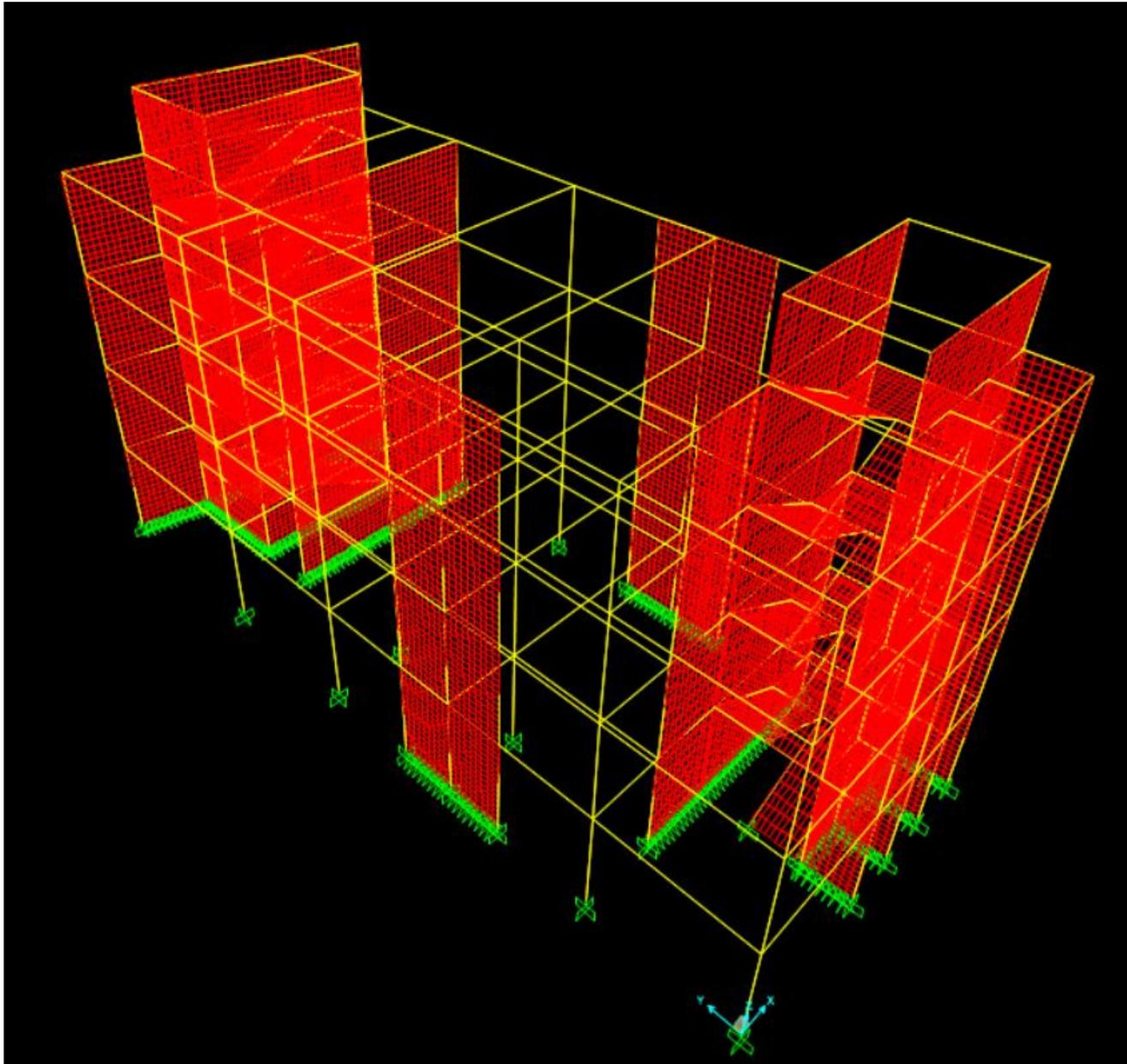
Anexo 6



Fuente: (Peralta, Modelo SAP 2000 de Edificio).

98

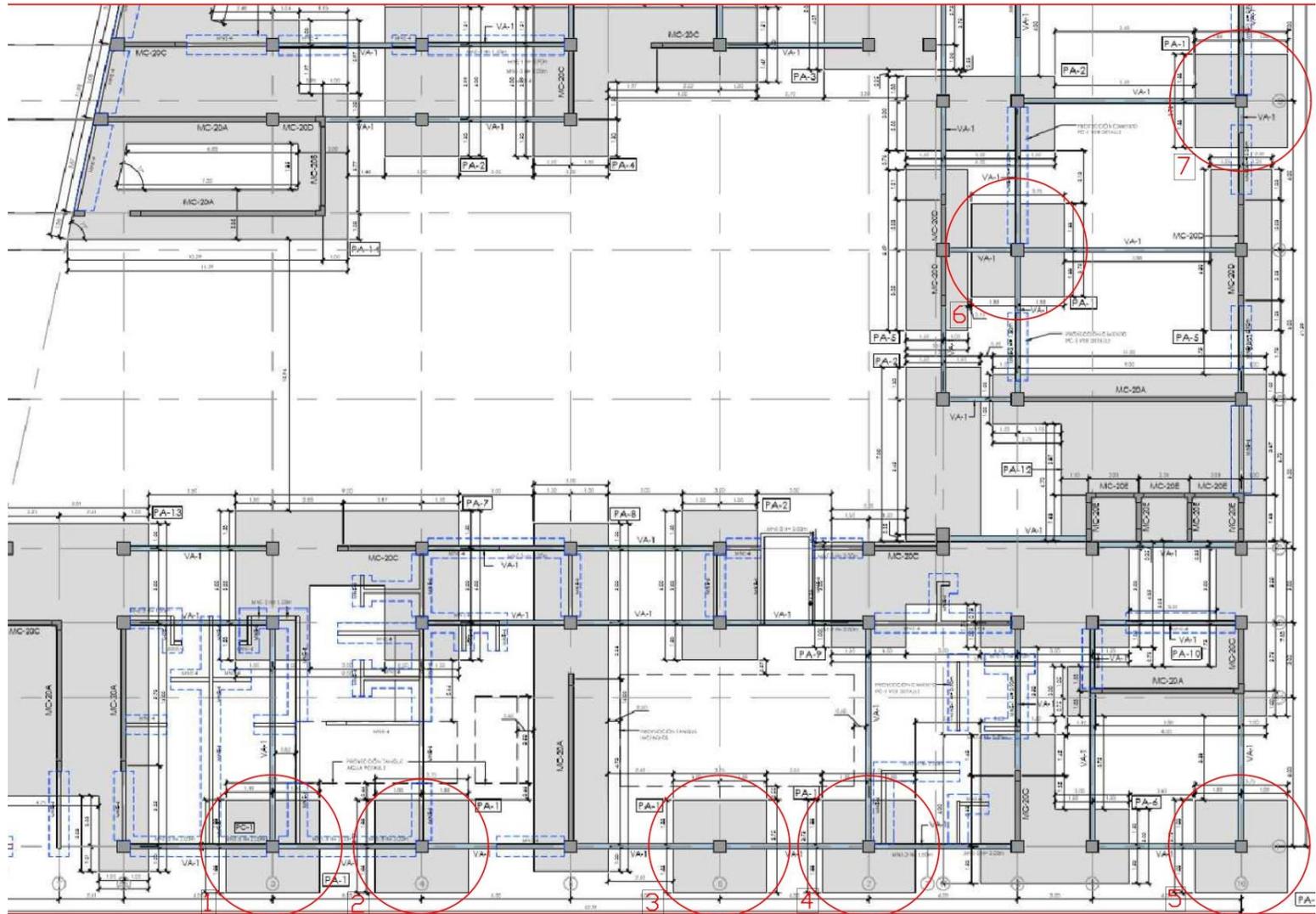
Comparación de diseño estructural para cimentaciones superficiales utilizando el método rígido convencional y el método Winkler por elementos finitos.



Fuente: (Peralta, Modelo SAP 2000 de Edificio).

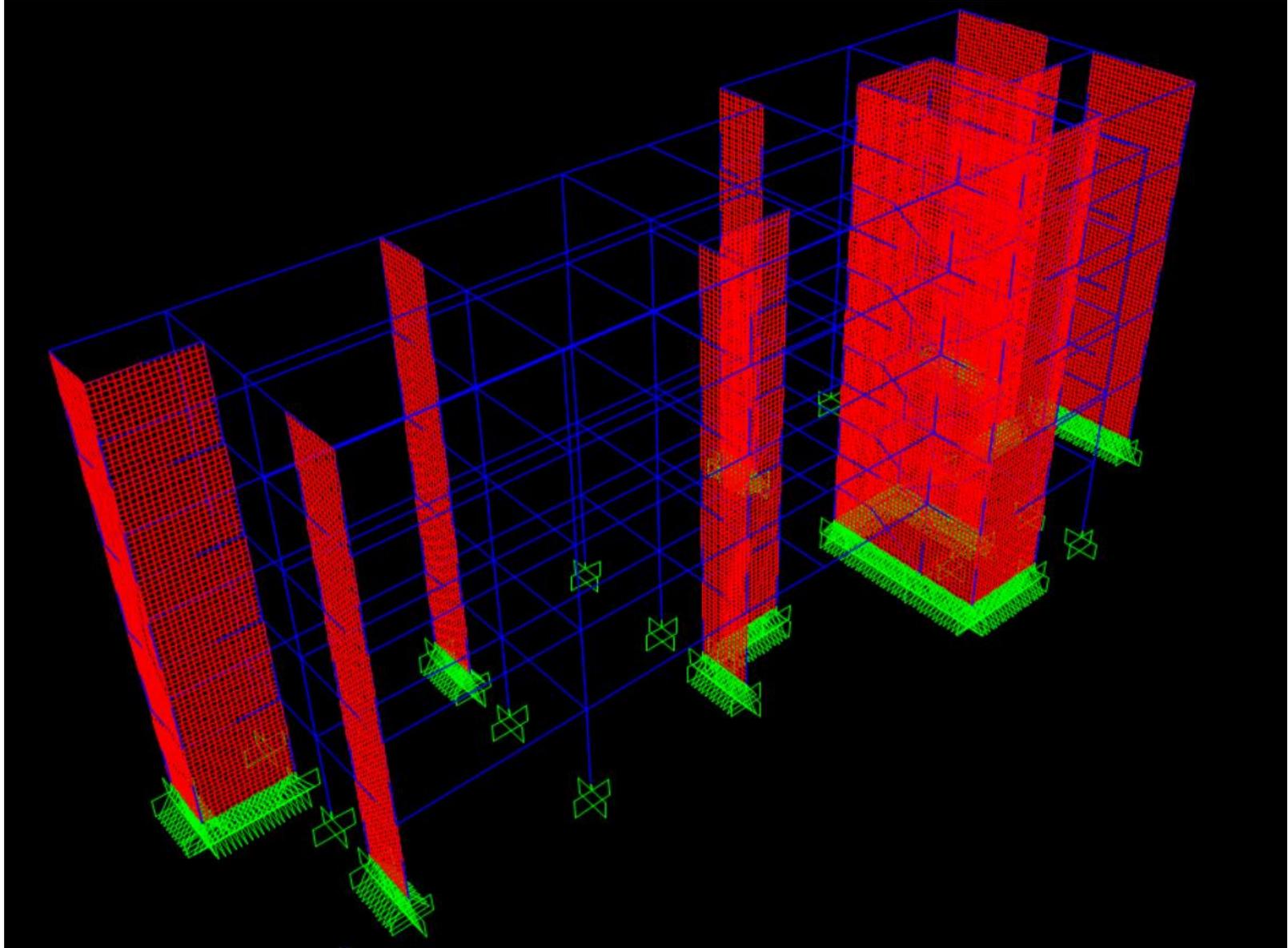
99

Comparación de diseño estructural para cimentaciones superficiales utilizando el método rígido convencional y el método Winkler por elementos finitos.



Fuente: (Peralta, Planos Constructivos de Edificio, 2020).

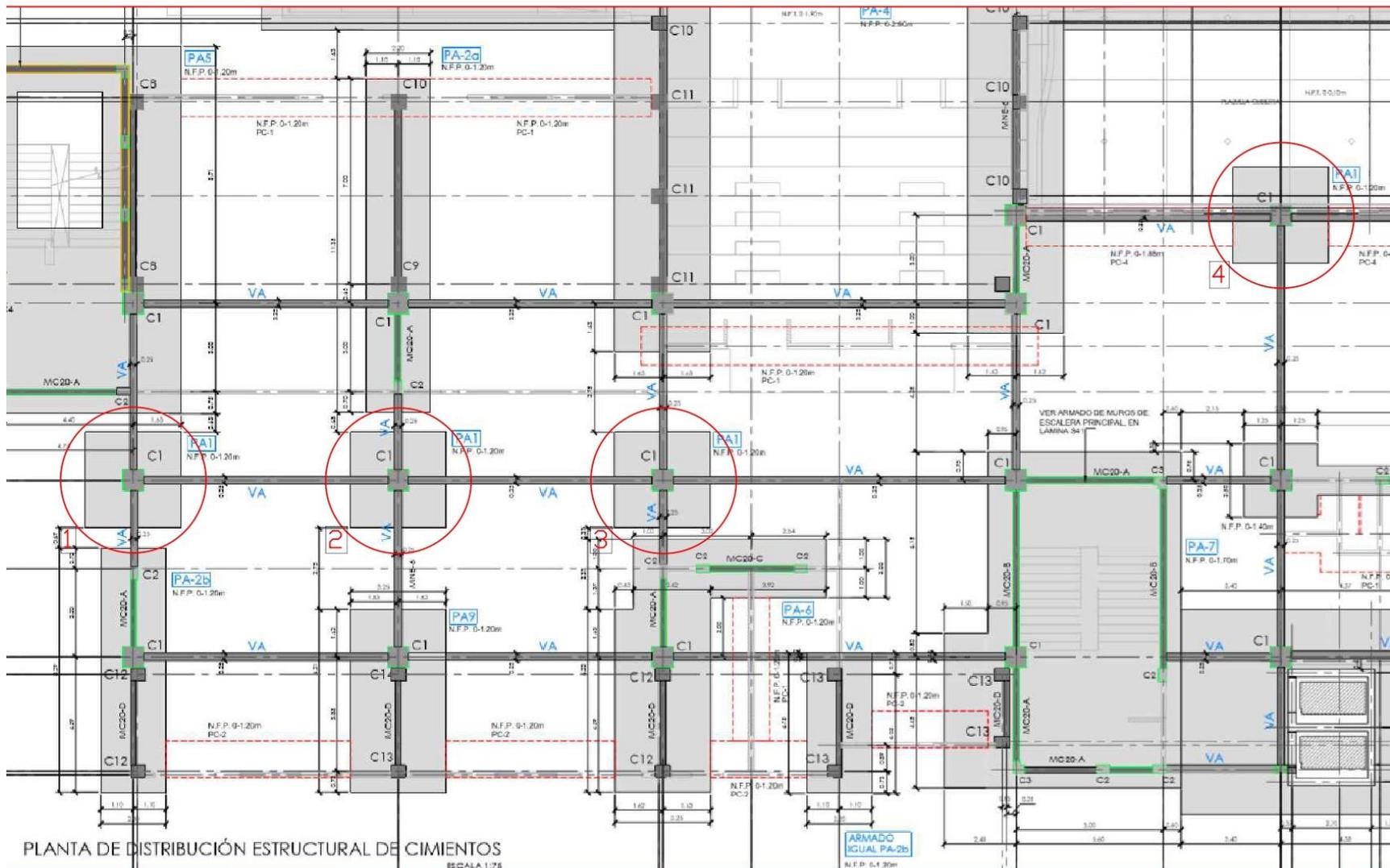
Anexo 7



Fuente: (Peralta, Modelo SAP 2000 de Edificio).

101

Comparación de diseño estructural para cimentaciones superficiales utilizando el método rígido convencional y el método Winkler por elementos finitos.



Fuente: (Peralta, Planos Constructivos de Edificio, 2020).

Anexo 9

Caja Costarricense de Seguro Social			
Concepto	Patrono	Trabajador	Porcentaje
SEM	9.25%	5,50%	14,75%
IVM	5,25%	4,00%	9,25%
TOTAL CCSS	14,50%	9,50%	24,00%
Recaudación otras instituciones			
Cuota Patronal Banco Popular			0,25%
Asgnaciones familiares			5,00%
IMAS			0,50%
INA			1,50%
TOTAL OTRAS INSTITUCIONES			7,25%
Ley de Protección al Trabajador(LPT)			
Aporte patrono Banco Popular			0,25%
Fondo Capitalización Laboral			1,50%
Fondo de Pensiones Complementarias			2,00%
Aporte Trabajador Banco Popular			1,00%
INS			1,00%
Total LPT			5,75%
TOTAL			37,00%

Fuente: (Caja Costarricense de Seguro Social, 2020).

Anexo 9

Actividad	unidad	Ope	Ayud	Peon	HH
Movimiento de Tierra					
Limpieza y desmonte	m2	1			0,00187
Fijación de Terrazas	m3	1		1	0,216
Demarcacion depuntos	m2	1		1	0,002326
Colocacion de yuguetas y cuerdas	m2	1		1	0,047
Ajuste de terraza	m2			4	0,02182
Cimientos					
Excavacion de placas	m3	1	1	1	0,7
Chorrea de sello	m3			6	3,685
Confeccion de armadura de placa	kg		1		0,03917
Colocacion de armadura de placa	kg	1	1		0,07235
Colado de placa corrida	m3	1		7	6,233

Fuente: (Lemus, 1985).

Referencias

- America Concrete Institute. (2019). *Requisitos de Reglamentos para Concreto Estructural (ACI 318S-19)*. Farmington Hills: ACI.
- Anoyatis, G., & Mylonakis, G. (2012). Dynamic Winkler Modulus for Axially Loaded Piles. En G. Anoyatis, & G. Mylonakis, *Géotechnique* (págs. 521-536).
- Asociación Costarricense de Geotecnia. (2009). *Código de Cimentaciones de Costa Rica*. Cartago: Tecnológico de Costa Rica.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and Desing*. Singapore: McGraw-Hill.
- Caja Costarricense de Seguro Social. (3 de 12 de 2020). *Distribución de los porcentajes de cotización*. Obtenido de <https://www.ccss.sa.cr/calculadora>
- CFIA. (2010). *Código Sísmico de Costa Rica 2010*. Cartago: Tecnológica de Costa Rica.
- Colina, A. D. (s.f.). *Interacción estática suelo-estructura en cimentaciones someras*. Obtenido de http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/cu/cu_20/te_01/ar_01.pdf
- Construplaza. (2 de 12 de 2020). *PRECIOS DE MATERIALES*. Obtenido de <https://www.construplaza.com/>
- Contreras, M. (3 de 12 de 2020). *TABLA DE RENDIMIENTOS DE MANO DE OBRA*. Obtenido de Universidad de Santo Thomas, Colombia: https://www.academia.edu/6118192/1701_TABLA_DE_RENDIMIENTOS_DE_MANO_DE_OBRA?auto=download
- Cormac, J. ..., & Brown, R. H. (2018). *Diseño de Concreto Reforzado*. Ciudad de México: Alfaomega Grupor Editor, S.A.
- Das, B. M. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Boston: Cengage Learning.
- Esquivel, M. S. (Noviembre de 2005). *Análisis y diseño de losas para fundación*. Obtenido de <http://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/ha>
- ndle/2238/6205/analisisydisenodelosasparafundacion.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- FreireTello, M. J. (29 de julio de 1999). *PRECISIONES PARA EL EMPLEO DEL MÉTODO DEL MÓDULO DE BALASTO EN EDIFICACIÓN*. Obtenido de <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/viewFile/863/947>
- Gazetas, G. (1991). Foundation Vibrations. En F. HY, *Foundation Engineering Handbook* (págs. 553-593).
- Grupo Orosí. (2 de 12 de 2020). *Consulta vía telefonica de precio de cocnreto premezclado 245 kg/cm2*.
- Guerra, E., Moreira, M. Z., & Meyleen, M. (2019). *Comparación de metodologías de análisis en el diseño geotécnico-estructural de cimentaciones superficiales en depósitos con suelos blandos*. Obtenido de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/13838?locale=en>
- Lemus, E. E. (1985). *EVALUCIÓN Y ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE LA MANO DE OBRA EN LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS DE UNO A CUATRO PISOS*. Cartago.
- Luco, J. E., & Westmann, R. A. (1971). Dynamic response of circular footings. En J. o. Mechanics.
- Menargue, M. N. (s.f.). *ESTUDIO NUMERICO PARAMETRIZADO DEL PUNZONAMINETO EN LOSAS DE HORMIGON ARMADO. EVALUACIÓN DEL REFUERZAO ESTRUCTURAL*. Obtenido de https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/83429/1/tesis_miguel_navarro_menargues.pdf
- Meza Rodríguez, J. A., & Valderrama Carpio, C. J. (Diciembre de 2014). *Influencia de la interacción suelo-estructura en la reducción de esfuerzos de una edificación aporticada con zapatas aisladas*. Obtenido de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/346266>
- MINISTERIO DE TRABAJO Y SEGURIDAD SOCIAL. (3 de 12 de 2020). *LISTA DE SALARIOS*. Obtenido de http://www.mtss.go.cr/temas-laborales/salarios/Documentos-Salarios/lista_salarios_2020.pdf

- Morrison, N. (1993). *Interacción Suelo-Estructuras: Semi-espacio de Winkler*. Obtenido de https://www.academia.edu/7339456/Modulo_de_Reaccion_del_Suelo_Datos_para_SAFE
- Mylonakis, G., Nikolaou, S., & Gazetas, G. (2006). Footings under seismic loading: Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations. En *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (págs. 824-853).
- National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP). (Septiembre de 2012). *Soil-Structure Interaction for Building Structures*. Obtenido de <https://nehrp.gov/pdf/nistgcr12-917-21.pdf>
- Ortiz, J. M., Gesta, J. S., & Mazo, C. O. (1989). *CURSO APLICADO DE CIMENTACIONES*. Madrid: GRAFICINCO, S.A.
- Pais, A. L., & Kausel, E. (1988). Approximate formulas for dynamic stiffnesses of rigid foundations. En *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (págs. 213-227).
- Peralta, M. (2018). *Interacción Suelo – Estructura: "Un cambio en el paradigma de Cálculo"*. Cartago.
- Peralta, M. (2020). Planos Constructivos de Edificio. Cartago, Cartago, Costa Rica.
- Peralta, M. (s.f.). Modelo SAP2000 de Edificio. Cartago, Cartago, Costa Rica 2020.
- Piqueras, V. Y. (12 de 11 de 2019). *Asientos de cargas rectangulares en el semiespacio de Boussinesq*. Obtenido de <https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/11/12/asientos-de-cargas-rectangulares-en-el-semiespacio-de-boussinesq/>
- Torrío, L. C., & Tapia, G. S. (Abril de 2009). *MATERIAL DE APOYO DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE DE LA ASIGNATURA DE FUNDACIONES I*. Obtenido de https://www.academia.edu/40254096/MATERIAL_DE_APOYO_DIDACTICO_PARA_LA_ENSEANZA_Y_APRENDIZAJE_DE_LA_ASIGNATURA_DE_FUNDACIONES_I_TEXTO_ALUMNO_Presentado_por_LISBETH_CARMICAMACHO_TORRICO_GABRIELA_SEMPERTEGUI_TAPIA_Tutor
- Valero, E. F. (Setiembre de 2004). *Tesis Doctoral "APORTACIONES AL ESTUDIO DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE FLUJO AXIAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS"*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93606/01Efv01de23.pdf>
- Veletsos, A. S., & Wei, Y. T. (1971). Lateral and Rocking Vibration of Footings. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*.
- Wight, J. K., & MacGregor, J. G. (2012). *Reinforced Concrete Mechanics and Design*. New Jersey: Pearson .