



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO PARAMÉTRICO DEL ESPESOR DE CIMENTACIONES RÍGIDAS,
UTILIZANDO LA NORMA ACI 336.2R-88 Y EL MODELO WINKLER POR MEDIO
DEL PROGRAMA SAFE**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingenieros Civiles

AUTORES: Juan Sebastian Sarango Alba

Bryan Steeven Trávez Carrasco

TUTOR: Freddy Israel Rodríguez Badillo

Quito - Ecuador
2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Juan Sebastian Sarango Alba con documento de identificación N° 1900866664 y Bryan Steeven Trávez Carrasco con documento de identificación N° 1726634874; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 26 de febrero del 2024

Atentamente,



Juan Sebastian Sarango Alba
1900866664



Bryan Steeven Trávez Carrasco
1726634874

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Juan Sebastian Sarango Alba con documento de identificación N° 1900866664 y Bryan Steeven Trávez Carrasco con documento de identificación N° 1726634874; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Estudio paramétrico del espesor de cimentaciones rígidas, utilizando la norma ACI 336.2R-88 y el modelo winkler por medio del programa SAFE”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 26 de febrero del 2024

Atentamente,



Juan Sebastian Sarango Alba

1900866664



Bryan Steeven Trávez Carrasco

1726634874

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Freddy Israel Rodríguez Badillo con documento de identificación N° 1720094026, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ESTUDIO PARAMÉTRICO DEL ESPESOR DE CIMENTACIONES RÍGIDAS, UTILIZANDO LA NORMA ACI 336.2R-88 Y EL MODELO WINKLER POR MEDIO DEL PROGRAMA SAFE, realizado por Juan Sebastian Sarango Alba con documento de identificación N° 1900866664 y Bryan Steeven Trávez Carrasco con documento de identificación N° 1726634874, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 26 de febrero del 2024

Atentamente,



Ing. Freddy Israel Rodríguez Badillo, MSc.
1720094026

ESTUDIO PARAMÉTRICO DEL ESPESOR DE CIMENTACIONES RÍGIDAS, UTILIZANDO LA NORMA ACI 336.2R-88 Y EL MODELO WINKLER POR MEDIO DEL PROGRAMA SAFE

PARAMETRIC STUDY OF THE THICKNESS OF RIGID FOUNDATIONS, USING THE ACI 336.2R-88 STANDARD AND THE WINKLER MODEL BY MEANS OF THE SAFE PROGRAM

Juan Sarango-Alba¹, Bryan Trávez-Carrasco²

Resumen

Esta investigación aborda las interacciones estáticas entre la losa de cimentación y el suelo, considerando diversas variables que afectan su respuesta estructural, se analizan parámetros como el número de niveles, distancias entre columnas, espesor de las losas y rigidez de suelo subyacente para comprender el comportamiento de la cimentación.

La investigación toma en cuenta el código ACI 336.2R-88 como marco normativo, proporcionando directrices para definir si es rígida o flexible la losa de cimentación. Se utilizó el software ETABS para generar modelos estructurales y obtener las solicitaciones, junto con el programa SAFE para el diseño de cimentaciones.

La metodología se centra en la aplicación de la teoría de cimentaciones elásticas y la teoría de Winkler, empleando herramientas de análisis avanzadas como el método de elementos finitos que en un software implica dividir una estructura en elementos discretos. El software resuelve numéricamente ecuaciones matemáticas, ofreciendo información detallada sobre tensiones y deformaciones en la estructura analizada, para evaluar la respuesta geotécnica estructural en diversas condiciones. La aplicación establece un

Abstract

This research addresses the static interactions between the foundation slab and the soil, considering various variables that affect its structural response. Parameters such as the number of levels, distances between columns, slab thickness, and underlying soil stiffness are analyzed to understand foundation behavior.

The research takes into account the ACI 336.2R-88 code as the regulatory framework, providing guidelines to define whether the foundation slab is rigid or flexible. The software ETABS was used to generate structural models and obtain solicitations, along with the SAFE program for foundation design.

The methodology focuses on the application of elastic foundation theory and Winkler theory, employing advanced analysis tools such as the finite element method, which involves dividing a structure into discrete elements within software. The software numerically solves mathematical equations, providing detailed information on stresses and deformations in the analyzed structure to evaluate the geotechnical-structural response under various conditions. The application establishes a solid theoretical framework for understanding the soil-structure interaction in the specific context of

¹ Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, campus Sur - Ecuador

² Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, campus Sur– Ecuador
Autor para correspondencia: jsarangoa1@est.ups.edu.ec, btravezc@est.ups.edu.ec

marco teórico sólido para entender la interacción suelo-estructura en el contexto específico de las losas de cimentación.

Se han obtenido diversos resultados que abarcan distintos aspectos fundamentales para el análisis y diseño de las cimentaciones. A través de un análisis lineal estático, se han determinado las solicitaciones aplicadas a cada columna, para su uso en el SAFE.

En cuanto al diseño de las losas de cimentación, se han establecido alturas necesarias considerando factores críticos vinculados a la carga y distribución de fuerzas en el suelo de apoyo.

La caracterización de los perfiles de deformación de las losas de cimentación en contacto con el suelo se ha llevado a cabo mediante la tabulación de datos obtenidos a través del software especializado SAFE.

Adicionalmente, se han evaluado la distorsión angular y porcentajes de asentamiento en cada escenario de análisis, proporcionando una visión integral de la capacidad de respuesta del sistema frente a diversas condiciones de carga y características del suelo.

Palabras Clave: análisis estático, coeficiente de balasto, espesor, distorsión angular, losa de cimentación, rigidez.

foundation slabs.

Various results have been obtained covering different fundamental aspects for the analysis and design of foundations. Through static linear analysis, solicitations applied to each column have been determined for use in SAFE.

Regarding the design of foundation slabs, necessary heights have been established considering critical factors related to load and force distribution in the supporting soil. The characterization of the deformation profiles of the foundation slabs in contact with the soil has been carried out by tabulating data obtained through the specialized software SAFE.

Additionally, angular distortion and settlement percentages have been evaluated in each analysis scenario, providing a comprehensive view of the system's response capacity to various loading conditions and soil characteristics.

Keywords: static analysis, ballast coefficient, thickness, angular distortion, foundation slab, stiffness.

1. Introducción

Esta investigación se enfoca en un estudio de las interacción estática entre la losa de cimentación y rigidez del suelo, considerando diversas variables que inciden en su respuesta geotécnica estructural.

El objeto de estudio abarca una gama de parámetros esenciales, entre los cuales se destacan la rigidez del suelo, el espesor de las losas de cimentación, la luz entre columnas y el número de niveles de la edificación. La variación de estos factores busca comprender de manera integral el comportamiento de la losa de cimentación, proporcionando así información valiosa para determinar la rigidez de las cimentaciones y la toma de decisiones en la práctica ingenieril.

Se varió el coeficiente de balasto y altura de losa de cimentación, consiguiendo determinar el comportamiento rígido o flexible de la losa de cimentación.

Se tomará en consideración la teoría de Winkler la cual proporciona un marco teórico sólido para comprender la interacción estática suelo-estructura en el contexto específico de las losas de cimentación.

Se propone aportar conocimientos significativos en losas de cimentación para la optimización del diseño de estructuras aporticadas simétricas, considerando las complejas interacciones entre la losa de cimentación y los asentamientos diferenciales. El análisis detallado de parámetros clave bajo el marco normativo del ACI y con el respaldo de herramientas de software avanzadas contribuirá al avance y la eficiencia en el ámbito de la ingeniería estructural.

2. Materiales y Métodos

2.1. Materiales

2.1.1. Características del suelo y parámetros geotécnicos

En la formulación del análisis, se consideraron los valores del módulo de elasticidad del suelo para el cálculo del coeficiente de balasto, extraídos de fuentes bibliográficas, tomando en cuenta la transición de la condición de suelo blando a rígido.

Tabla 1. Parámetros del suelo

Tipo de suelo	Módulo de elasticidad E_s (kg/cm ²)	Coefficiente de Poisson, ν_s
Blando	50	0.45
Semiblando	100	0.35
Semirrígido	200	0.30
Rígido	400	0.25

2.1.2. Estructuras aporticadas

Para las estructuras aporticadas analizadas se planteó una geometría idealmente cuadrada y simétrica en la cual varían las luces al igual que el número de niveles, a continuación, se detalla las características de cada una de las edificaciones.

Tabla 2. Dimensiones de la estructuras aporticadas con luces de 4 metros, Edificación A

Niveles	Dimensiones de los elementos estructurales		
	Losa de entrepiso (h,cm)	Vigas (bxh,cm)	Columnas (bxh,cm)
3	25	25X30	30X30
5	25	25x30	40x40
7	25	20x30	45x50

Tabla 3. Dimensiones de la estructuras aporticadas con luces de 6 metros, Edificación B

Niveles	Dimensiones de los elementos estructurales		
	Losa de entrepiso (h,cm)	Vigas (bxh,cm)	Columnas (bxh,cm)
3	30	35x55	35X35
5	30	35x55	50x50
7	30	35x55	60x60

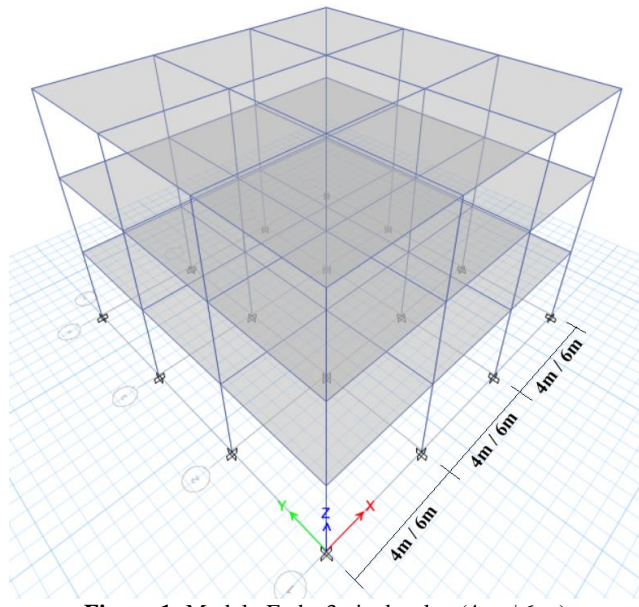


Figura 1: Modelo Etabs 3 niveles, luz (4 m / 6 m)

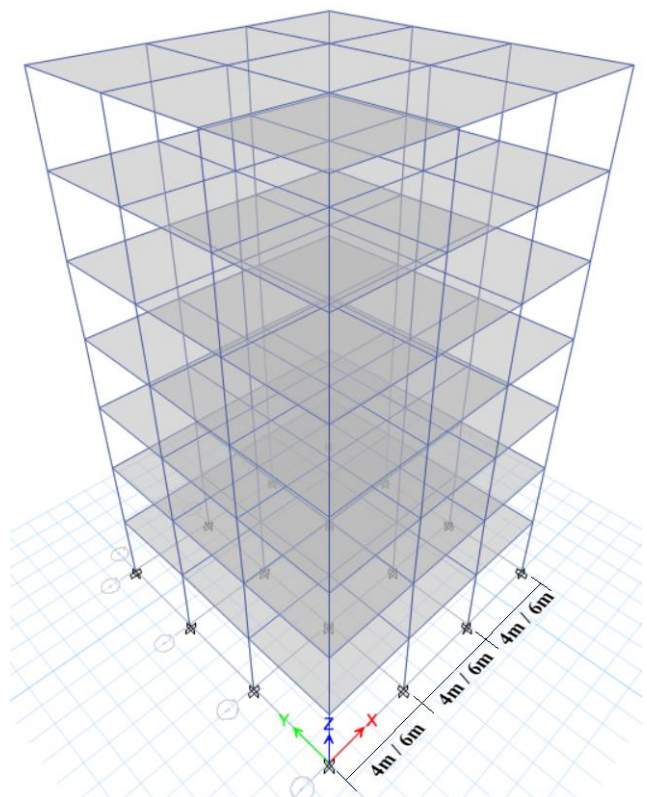


Figura 3: Modelo Etabs 7 niveles, luz (4 m / 6 m)

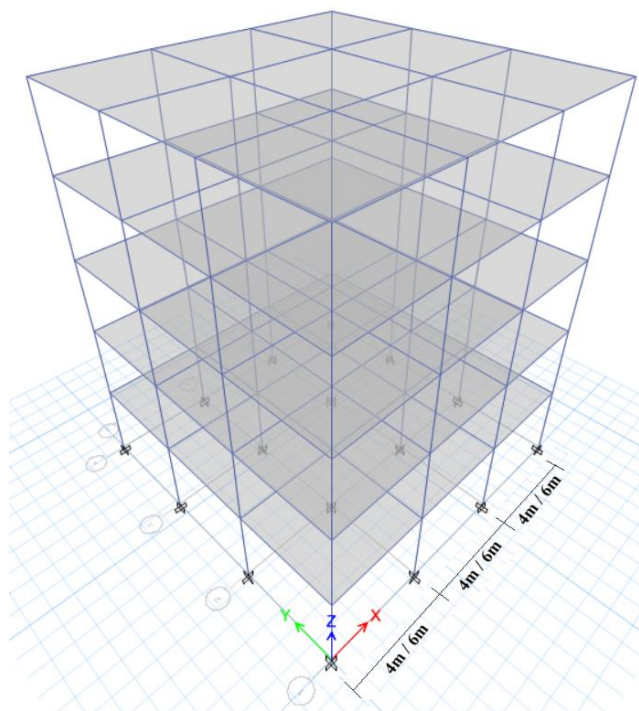


Figura 2: Modelo Etabs 5 niveles, luz (4 m / 6 m)

2.1.3. Cargas

Las cargas presentes en las estructuras son gravitacionales únicamente, se tomaron en cuenta las cargas uniformemente repartidas, descritas a continuación:

Carga Muerta: para definir la carga muerta se toma en cuenta los pesos permanentes de los elementos estructurales, columnas, vigas, losa de entrepiso.

Sobrecarga: en la sobrecarga se consideran los pesos de mampostería, mortero, acabados, dando como total un valor de 0.030 kg/cm^2 .

Carga viva: esta carga está definida de acuerdo con el uso destinado de la estructura, de acuerdo con la NEC-SE-CG, considerando residencias unifamiliares y bifamiliares se usó un valor de 0.020 kg/cm^2 .

2.2. Metodología

2.2.1. Cimentaciones Superficiales

La cimentación de una edificación se detalla como la base estructural la cual sustenta las cargas que se transfieren al suelo. Este tipo de cimentación se ubican en la capa superficial del suelo, sin la necesidad de exceder grandes profundidades de excavación. Como punto importante a contemplar una cimentación rígida se debe considerar que los esfuerzos no excedan la carga de capacidad admisible.

Según la NEC-SE-GC [3] clasifica como cimentación superficial a partir de la siguiente relación:

$$\frac{Df}{B} \leq 4 = \text{cimentación superficial} \quad (1)$$

Donde:

Df: profundidad de desplante

B: ancho de cimentación

2.2.2. Cimentación Rígida

La cimentación rígida se diseña con el propósito de recibir, distribuir y transmitir de manera uniforme las cargas provenientes de una estructura hacia el suelo subyacente de manera que los asentamientos sean constantes.

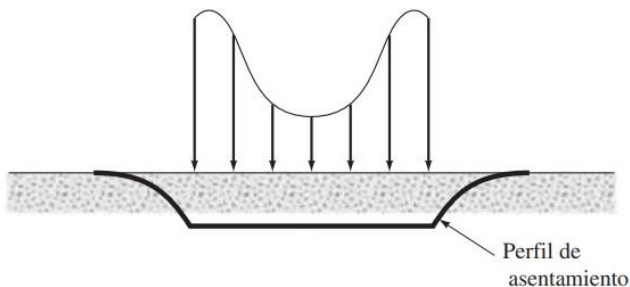


Figura 4. Perfil de asentamiento, cimentación rígida [15]

2.2.3. Cimentación flexible

Una cimentación flexible se caracteriza por su capacidad para deformarse y adaptarse a los

asentamientos variables en las condiciones del suelo y las cargas aplicadas. Esta cimentación permite una respuesta elástica controlada, distribuyendo las fuerzas de manera eficiente y absorbiendo deformaciones sin poner en riesgo la estabilidad estructural. La flexibilidad en la cimentación es fundamental para controlar los asentamientos diferenciales o cambios en las propiedades del suelo, garantizando un comportamiento adecuado de la estructura.

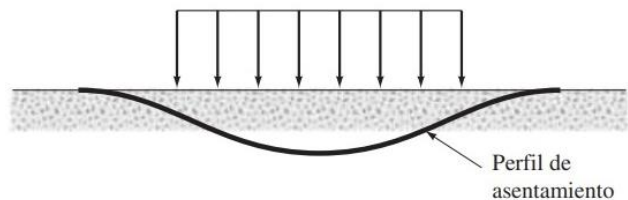


Figura 5: Perfil de asentamiento, cimentación flexible [15]

2.2.4. Modelo numérico en ETABS

Para la modelación en el software ETABS se realizó un dimensionamiento de los elementos estructurales (losa, vigas, columnas) usando una hoja de cálculo para realizar dicho análisis, los datos se encuentran presentados anteriormente en las tablas 1 y 2.

Este software modela la estructura dividiéndola en elementos finitos, representando cada componente mediante ecuaciones matemáticas. A través de iteraciones y métodos numéricos avanzados, ETABS resuelve el sistema de ecuaciones resultante, proporcionando información detallada sobre deformaciones, fuerzas, esfuerzos y desplazamientos.

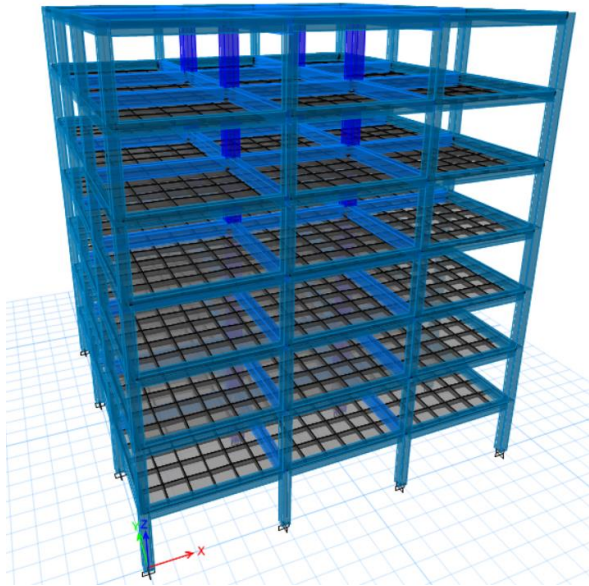


Figura 6: Modelo Etabs 7 niveles, luz cuatro/seis metros (4 m/6 m)

2.2.5. Modelo numérico en SAFE

Para realizar el modelo de la losa de cimentación previamente se realizó un predimensionamiento del espesor de la cimentación en una hoja de cálculo utilizando la solicitación de cargas en cada columna obtenidas desde el modelo estructural en ETABS.

Este software discretiza la cimentación en elementos finitos y aplica ecuaciones matemáticas para describir su comportamiento. Mediante métodos numéricos avanzados, resuelve el sistema de ecuaciones resultante, ofreciendo información detallada sobre esfuerzos y deformaciones. Sin embargo, en el software se debe asignar la rigidez del suelo mediante la aplicación de resortes de área.

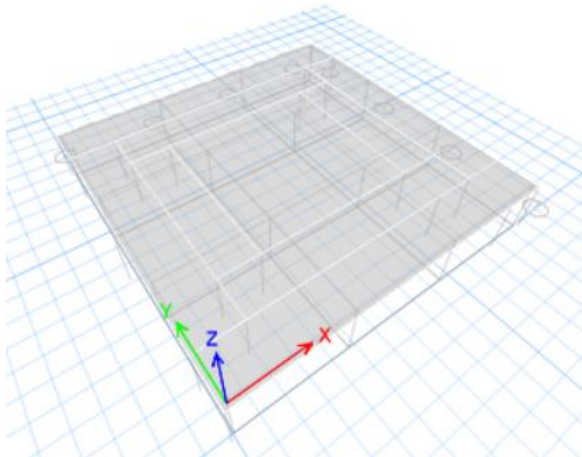


Figura 7: Modelo SAFE losa de cimentación, luz cuatro/seis metros (4 m/6 m)

2.7.1. Teoría de Winkler

La teoría de Winkler es un enfoque matemático en ingeniería geotécnica, conceptualiza el comportamiento de una cimentación y su interacción con el suelo circundante mediante la representación de este último como una serie de resortes puntuales, lineales o de área. Cada resorte es distribuido en la base de la cimentación, simboliza la respuesta de la interfaz suelo-cimentación en puntos discretos.

Este modelo simplificado se basa en la suposición de comportamiento lineal y elástico tanto para el suelo como para la cimentación, empleando la ley de Hooke para describir la relación entre las cargas aplicadas y las deformaciones resultantes en el suelo. [10] La siguiente fórmula supone una relación lineal entre la presión aplicada y el asentamiento:

$$q = k_s * S_e \quad (2)$$

q: reacción del terreno (esfuerzo)

k_s: coeficiente de balasto

S_e: asentamiento bajo la cimentación



Figura 8: Modelo de Winkler

En la figura 8, se evidencia, en el gráfico (a), que la aplicación de una carga uniformemente distribuida sobre la totalidad del área de la losa de cimentación, con una altura menor, genera asentamientos variables en los resortes (cimentación flexible). En contraste, en el gráfico (b), se nota que, al aumentar la altura, los asentamientos en los resortes se mantienen constantes (cimentación rígida).

Las limitaciones de esta teoría destacan la naturaleza simplificada del modelo de Winkler, que, aunque valioso para análisis rápidos y aproximados, puede no ser adecuado en

condiciones geotécnicas más complejas, estas limitaciones son

- No Linealidad del Suelo:

Una limitación importante del modelo de Winkler radica en su incapacidad para capturar de manera precisa la no linealidad del comportamiento del suelo. En situaciones donde el suelo exhibe una respuesta no lineal a las cargas aplicadas, el modelo puede proporcionar estimaciones inexactas, ya que asume una relación lineal entre las cargas y las deformaciones.

- Variaciones en la Profundidad:

Esta teoría supone que el suelo puede representarse como una serie de resortes verticales uniformemente distribuidos en el área de contacto suelo-cimentación, sin considerar variaciones significativas en las propiedades del suelo en diferentes niveles. Esta simplificación puede no reflejar con precisión la realidad, ya que, en muchos casos prácticos, las propiedades del suelo varían de manera significativa en función de la profundidad.

- Interacción Lateral:

Otra limitación significativa de la teoría es la omisión de la interacción lateral entre los resortes distribuidos. En situaciones donde las cargas inducen desplazamientos laterales considerables, el modelo de Winkler subestima la rigidez lateral del suelo, ya que no tiene en cuenta la contribución conjunta de los resortes adyacentes.

2.7.2. Módulo de reacción de la subrasante (ks)

Mayormente conocido como coeficiente de balasto, se lo define como la relación entre el esfuerzo normal actuante en un área determinada y

el asentamiento que se produce en el suelo, siendo importante en la interacción suelo-estructura.

Durante el desarrollo del análisis, se llevó a cabo cálculos utilizando distintas teorías, y entre las opciones disponibles, se decidió seleccionar el método basado en la ecuación de Dimitrov. Esta elección se llevó a cabo mediante un análisis gráfico de los datos obtenidos a través de las diferentes teorías, y se observó que la representación gráfica generada por el método de Dimitrov exhibía un valor del coeficiente de balasto intermedio con respecto a las otras teorías, se presenta la figura del análisis gráfico de las teorías para determinar el coeficiente de balasto:

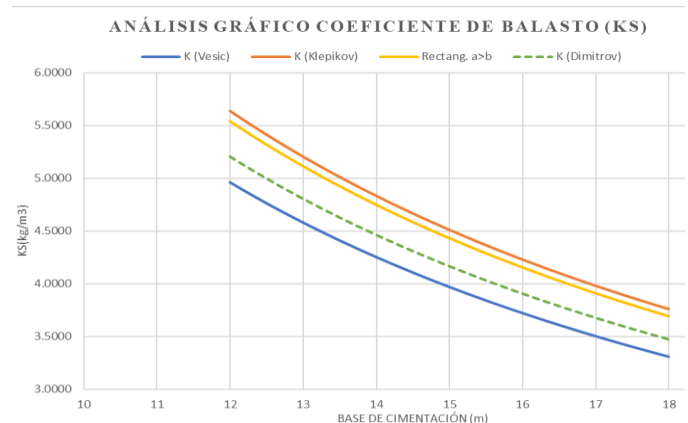


Figura 8: Teorías coeficiente de balasto

La ecuación de Dimitrov, conocida por su aplicabilidad en determinadas circunstancias, fue identificada como la más adecuada para abordar la naturaleza particular del análisis y proporcionar resultados confiables, esta ecuación se presentada a continuación:

$$ks = p * \frac{Es}{B * (1 - us^2)} \quad (3)$$

Donde:

Tabla 4. Coeficiente de forma p para la expresión de Dimitrov

L:B	1	1.5	2	3	5	10	20	30	50
p	1.05	0.87	0.78	0.66	0.54	0.45	0.39	0.33	0.3

ks: coeficiente de balasto

p: coeficiente de forma

Es: módulo de elasticidad del suelo

B: ancho de fundación

L: longitud de fundación

us: módulo de Poisson del suelo

Para la obtención de los coeficientes de balasto utilizados en este artículo se realizó en función del módulo de elasticidad del suelo.

En la tabla se distingue dos diferentes bases de cimentación considerando las dimensiones de la edificación A y B, de modo que a cada edificación le corresponde cuatro coeficientes de balasto.

Los resultados son los siguientes:

Tabla 5. Valores Coeficiente de Balasto

	Es (kg/cm ²)	B (m)	ks (kg/cm ³)
1	400		0.4167 0.2778
2	200		0.2083 0.1389
3	100	12 18	0.1042 0.0694
4	50		0.0521 0.0347

2.7.3. Verificación por punzonamiento

El corte por punzonamiento es un fenómeno estructural que se llega a presentar particularmente en columnas apoyadas sobre las losas de cimentación, refiriéndose a la forma en la que falla al aplicar una carga distribuida en un área reducida del elemento.

$$\phi * Vc \geq Vu \quad (4)$$

Vu: fuerza cortante que actúa sobre la sección.

Vc: resistencia al corte del hormigón

Ø: coeficiente menoración

Vc,máx: resistencia al corte máxima

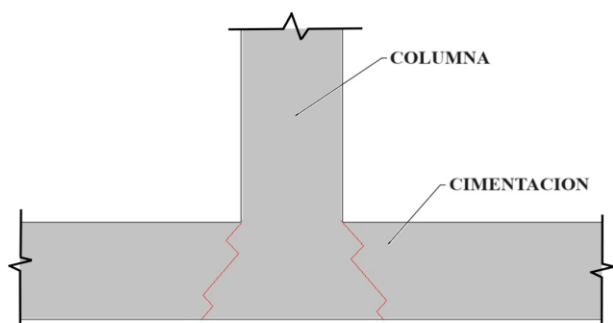


Figura 9: Corte por punzonamiento

A partir de la normativa del ACI 318-19 [2] presenta tres ecuaciones destinadas al cálculo del esfuerzo resistente al corte del hormigón, de las

cuales se selecciona y emplea aquella que represente el valor más crítico.

$$Vc1 \leq \left(1 + \frac{2}{\beta c}\right) * \frac{\sqrt{f'c} * bo * d}{6} \quad (5)$$

$$Vc2 \leq \left(\frac{\alpha s * d}{bo} + 2\right) * \frac{\sqrt{f'c} * bo * d}{12} \quad (6)$$

$$Vc3 \leq \frac{\sqrt{f'c} * bo * d}{3} \quad (7)$$

$$\beta c = \frac{b}{l} \quad (8)$$

bo: perímetro de punzonamiento.

d: altura útil del elemento estructural.

βc: coeficiente que relaciona los lados de la columna.

b: ancho de columna.

l: longitud de columna.

αs: parámetro que vale 40 para columnas interiores, 30 para columnas de borde y 20 para columnas esquineras.

Se realizó dos comprobaciones para verificar el corte por punzonamiento, la manual que consideró el mayor valor de la combinación de carga mayorada Pu, y a través del empleo del software SAFE se aplicó la función de diseño de corte por punzonamiento (punching shear design), esta herramienta presenta la relación y de los valores de esfuerzo cortante, solicitación para capacidad resistente, correspondientes a los puntos de apoyo sujetos a análisis.

Para las alturas más bajas de las losas de cimentación, que no cumplen con el requisito de punzonamiento, el programa proporcionó una relación de punzonado mayor a 1. Esta, representa la solicitación entre el máximo corte resistente, que es la capacidad máxima de corte del concreto, establecida en 12.3 kg/cm². Es importante destacar que este valor es el mismo para todos los modelos,

ya que se utiliza concreto de resistencia $f'_c=240$ kg/cm² en todas las edificaciones modeladas.

2.7.4. Criterios de flexibilidad de losas

Según la normativa ACI 336.2R-88 [1], se debe cumplir la siguiente condición para que una losa de cimentación sea considerada como rígida, presentada a continuación:

$$L_c < 1.75/\beta \quad (9)$$

Caso contrario

$$L_c \geq 1.75/\beta: \text{ cimentación flexible} \quad (10)$$

con:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{B * K_s}{4 * E_c * I}} \quad (11)$$

Lc: longitud entre columnas

Ks: coeficiente de balasto

Ec: módulo de elasticidad del hormigón

I: momento de inercia

2.7.5. Asentamientos diferenciales

El asentamiento diferencial se define como la desigualdad en el desplazamiento vertical entre dos puntos específicos de una cimentación.

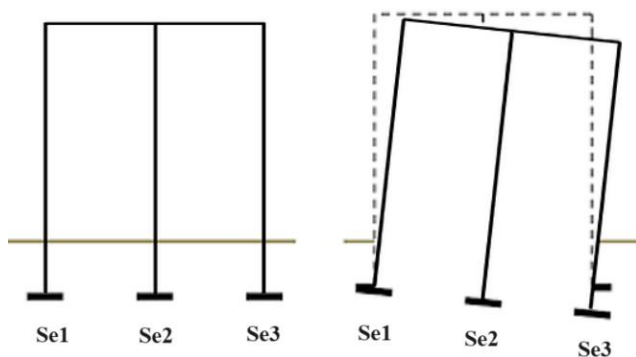


Figura 10: Asentamiento diferencial

Se expresa con la siguiente ecuación:

$$\Delta Se = Se_1 - Se_2 \quad (12)$$

Entonces:

ΔSe : asiento diferencial.

Se1: asentamiento elástico 1

Se2: asentamiento elástico 2

2.7.6. Distorsión angular y relación de asentamientos

La distorsión angular se formula como la relación entre el desplazamiento vertical no uniforme de dos puntos específicos en la base de la estructura y la distancia lineal que los separa.

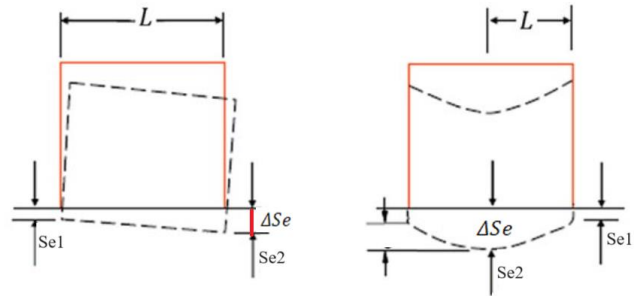


Figura 11: Distorsión angular

Se expresa con la siguiente ecuación:

$$\text{Distorsión angular} = \frac{\Delta Se}{L_c} \quad (13)$$

Donde:

ΔSe : asiento diferencial.

Lc: longitud entre columnas

Para el análisis de distorsión angular y en base a los límites de asentamientos diferenciales para prevenir daños en estructuras, según la NEC-SE-GC se define un valor de:

$$\Delta Se = L/500 \quad (14)$$

Mientras que el valor de 0.003 es un valor tentativo, establecido en base al análisis visual de las gráficas de los perfiles de asentamiento.

A partir de la distorsión angular se especifica cuando considerar una losa de cimentación de acuerdo con la zona en que se encuentre, como:

- Cimentación rígida ≤ 0.002
- $0.002 <$ Cimentación rigidez en transición < 0.003
- Cimentación flexible ≥ 0.003



Figura 12: Flexibilidad de la cimentación a función de la distorsión angular

Otro criterio de análisis considerado es el porcentaje de asentamiento elasticos con siguientes límites representados en la figura 13. Estos porcentajes establecen los umbrales que indican cuándo una losa de cimentación debe ser considerada como rígida, en transición o flexible.



Figura 13: Flexibilidad de la cimentación en función del porcentaje de asentamientos diferenciales

2.7.7. Sectorización del coeficiente de balasto

La directriz establecida por la normativa ACI 336.2R-88 sugiere la subdivisión de la losa de cimentación en 3 sectores designados como interno, de borde y externo. En este enfoque, se propone que el área interna abarque la mitad de la longitud total de la losa de cimentación, mientras que las áreas de borde y externa ocupen una octava parte de dicha longitud. Un aspecto adicional considerado es el aumento gradual del coeficiente de balasto en cada área a medida que se acerca al borde de la cimentación.

La representación gráfica siguiente ilustra cómo se distribuye el coeficiente de balasto en relación con la ubicación del

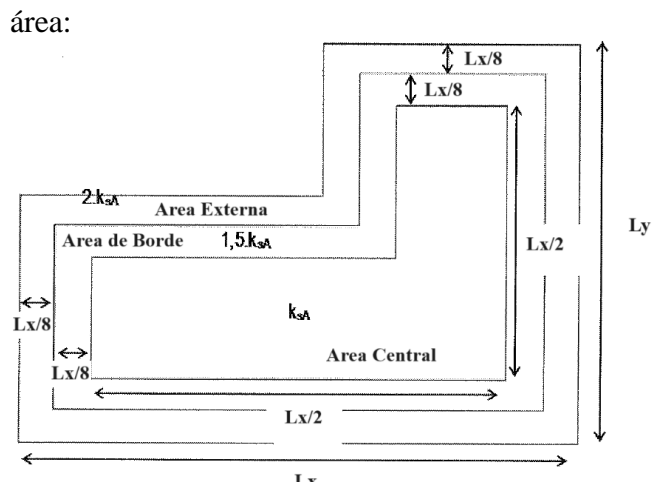


Figura 14: Sectorización del coeficiente de balasto (k_s) [10]

2.8. Escenarios de Análisis

Este estudio se centra en el análisis de dos edificios con diferentes características estructurales y geotécnicas para evaluar su desempeño bajo diferentes cargas y condiciones del suelo. Los factores más importantes que varían son el coeficiente de balasto, distancia entre las columnas del edificio y número de niveles

En la figura 15 se presenta los escenarios de análisis, se el número de niveles para cada edificación variando en 3,5 y 7, además se cuatro diferentes coeficientes de balasto para cada edificación y por último se varió cinco veces los espesores de losas de cimentación correspondientes a cada coeficiente de balasto, en total se analizó 120 modelos numéricos en SAFE.

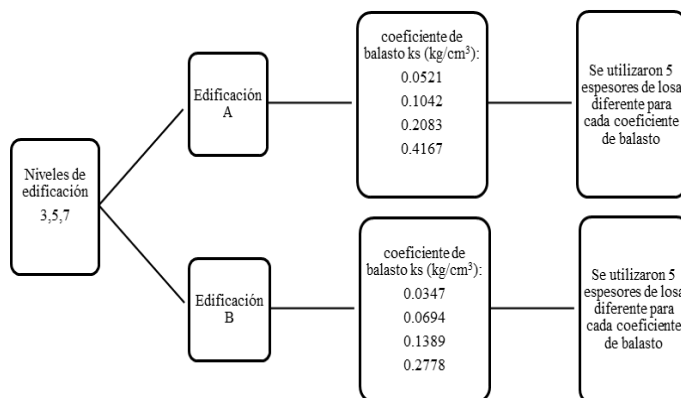


Figura 15: Diagrama escenarios de análisis

2.8.1. Edificaciones

Se presentan dos estructuras diferentes, se las mencionó como edificación A y edificación B, en cada estructura se varió el número de niveles en 3, 5 y 7, a continuación, se describen las edificaciones.

La edificación A presenta una luz entre columnas de 4 metros, generando condiciones estructurales y de carga únicas. Este escenario se ha diseñado considerando un rango de suelos, cada uno con cinco espesores distintos de losas de cimentación.

La edificación B se caracteriza por una luz entre columnas más amplia de 6 metros, lo que implica una distribución espacial diferente de las cargas en comparación con la estructura de menor luz. Este enfoque proporciona una visión integral de cómo las variaciones en la luz entre columnas afectan el comportamiento estructural en función del tipo de suelo.

2.8.2. Variación del coeficiente de balasto

Para realizar el análisis del artículo se consideró cuatro diferentes coeficientes de balasto para cada edificación, evaluados por la teoría de Dimitrov, cada coeficiente está en función del módulo de elasticidad del suelo y base de cimentación.

2.8.3. Espesores de Losas de Cimentación

La variación en los espesores de las losas de cimentación se ha establecido como una variable crucial para evaluar la influencia de la rigidez de la losa en el comportamiento de flexibilidad. La diversidad de espesores permite explorar cómo diferentes configuraciones de cimentación responden a las cargas aplicadas y las condiciones del suelo. Para obtener los cinco espesores de cimentación se realizó un cálculo previo en hoja de cálculo considerando que la resistencia al corte del hormigón sea mayor a la fuerza cortante que actúa sobre la sección.

3. Resultados y Discusión

3.1. Análisis lineal estático

Mediante el software ETABS se obtuvieron las solicitaciones por columnas medidas en toneladas fuerza para su respectiva edificación y número de niveles, como se muestra resumido en las figuras 16 y 17.

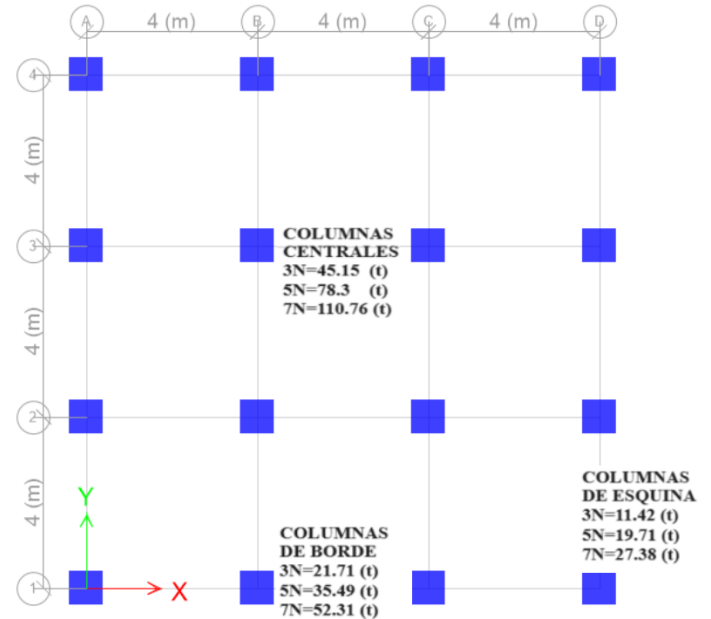


Figura 16: Esquema de cargas de servicio por columna para edificación A de 3, 5 y 7 niveles



Figura 17: Esquema de cargas de servicio por columna para edificación B de 3, 5 y 7 niveles

En el análisis de las solicitaciones por columnas en la estructura, se observó una variación significativa en la magnitud de las cargas transmitidas a los elementos de soporte. Específicamente, se identificó que las columnas centrales experimentaron la mayor magnitud de solicitaciones debido a una mayor área colaborante, sin embargo, al contrastar con las columnas de borde, se notó una disminución aproximada del 50% en la magnitud de las solicitaciones, por otro lado, las columnas ubicadas en las esquinas presentaron un valor de solicitación aún menor, aproximadamente una cuarta parte de la carga central por motivo de que presenta una menor área colaborante. Esta reducción se atribuye a la distribución de las cargas en las losas de entrepiso, donde las columnas centrales cargan una mayor área colaborante.

Esta metodología, ampliamente empleada, permite la evaluación de las reacciones de una estructura empotrada frente a cargas estáticas.

3.2. Diseño de losas de cimentación

A continuación, se presenta un resumen de las diferentes combinaciones de los tipos de suelos con sus características y los espesores de cimentación para cada una de las condiciones de las edificaciones.

En las tablas presentadas se puede apreciar cuatro distintos coeficientes de balasto, a los que corresponde cinco diferentes espesores de losas de cimentación, observando que en la edificación A para 7 niveles se tiene una configuración de losa de cimentación con mayor espesor para columnas de borde debido a que el área de corte efectivo es menor que en las columnas centrales, por tal motivo se aprecia dos espesores distintos, de igual manera para la edificación B para 5 y 7 niveles se consideró la misma configuración de losa de cimentación, así se cumplió el corte por punzonamiento en estas cimentaciones.

Tabla 6. Combinación de condiciones, Edificación A

Niveles	Coeficiente de Balasto (kg/cm ³)	h (cm)
---------	--	--------

3	0.0521 0.1042 0.2083 0.4167	30
		35
		40
		45
		50
5	0.0521 0.1042 0.2083 0.4167	35
		40
		45
		50
		55
7	0.0521 0.1042 0.2083 0.4167	35-45
		40-50
		45-55
		50-60
		55-65

Tabla 7. Combinación de condiciones, Edificación B

Niveles	Coeficiente de Balasto (kg/cm ³)	h (cm)
3	0.0347 0.0694 0.1389 0.2778	45
		50
		55
		60
		65
5	0.0347 0.0694 0.1389 0.2778	50-60
		55-65
		60-70
		65-75
		70-80
7	0.0347 0.0694 0.1389 0.2778	65-85
		70-90
		75-95
		80-100
		85-105

Para todos los casos de espesores presentados, se menciona que el menor espesor de cimentación analizado no cumple con la condición de corte por punzonamiento, los resultados revelan similitudes en los valores obtenidos entre las distintas edificaciones modeladas, con una relación de punzonado cercano a 1.15 para las alturas más bajas de las losas de cimentación. Este indicador sugiere que reducir estas alturas no es factible. A pesar de no cumplir con el parámetro de punzonamiento por corte, las losas de cimentación continúan exhibiendo un comportamiento rígido, destacando que la fórmula del ACI considera un

límite conservador para el comportamiento de losa rígida a flexible y no establece un rango para las losas que demuestran un comportamiento en transición de estado rígido a flexible.

3.3. Perfiles de deformación losa-suelo

En esta sección se realizó una comparación de los asentamientos en relación con el coeficiente de balasto y el espesor de la losa de cimentación, mediante el análisis del perfil de deformación obtenido a través del programa SAFE. Se utiliza una representación gráfica para evidenciar de manera visual el comportamiento y la tendencia de cada losa, el análisis se sustenta en el modelo de 7 niveles. Este enfoque se fundamenta en la capacidad del mencionado escenario para ofrecer una visualización mayor de los resultados, dado que el comportamiento deformacional en las edificaciones de 3, 5 y 7 niveles presentan comportamientos similares. A través de estas gráficas, se observó cómo el comportamiento de las losas tiende a ser más rígido o flexible en función de su espesor. Este enfoque permite una evaluación detallada de la influencia de las variables mencionadas en el comportamiento de las losas de cimentación.

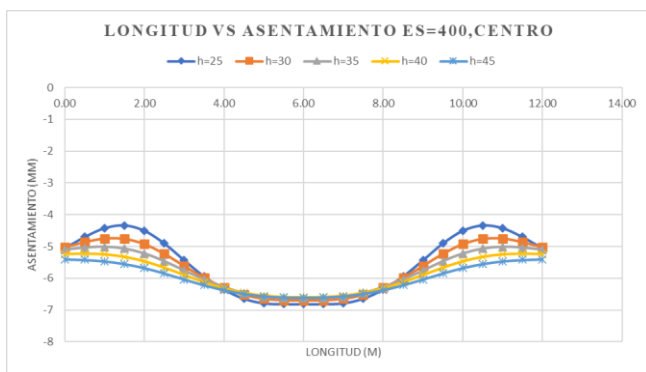


Figura 18: Perfil de asentamiento 7 Niveles, $E_s = 400 \text{ kg/cm}^2$, Edificación A, luces de 4 metros.

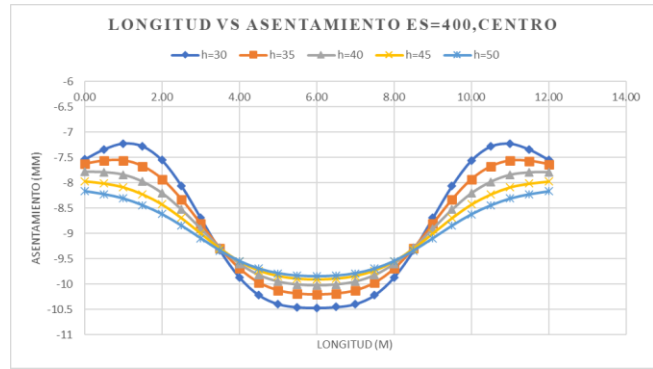


Figura 19: Perfil de asentamiento 5 Niveles, $E_s = 400 \text{ kg/cm}^2$, Edificación A, luces de 4 metros.

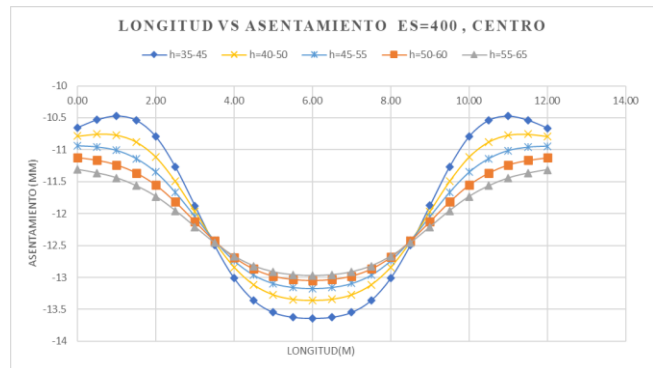


Figura 20: Perfil de asentamiento 3 Niveles, $E_s = 400 \text{ kg/cm}^2$, Edificación A, luces de 4 metros.

En el análisis gráfico se evidencia que, al mantener constante un coeficiente de balasto vinculado al módulo de elasticidad de 400 kg/cm^2 para la edificación A, se presenta una similitud en el comportamiento deformacional pero con una variación en la magnitud de asentamiento de las losas de cimentación. A pesar de que la edificación A presenta variaciones en su número de niveles (3, 5 y 7), el comportamiento de las losas sigue siendo similar.

Aquellas losas con menor espesor se mantienen en el dominio de cimentación rígida. Contrariamente, las losas de mayor espesor se alejan de dicho rango, exhibiendo el comportamiento más rígido entre todas las variaciones de espesor analizadas.

EDIFICACIÓN A:

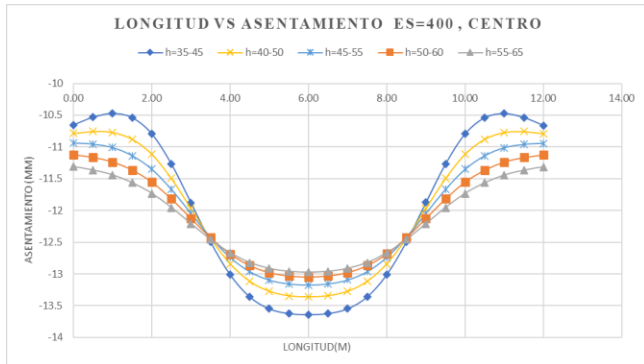


Figura 21: Perfil de asentamiento 7 Niveles, $E_s = 400 \text{ kg/cm}^2$, Edificación A, luces de 4 metros.

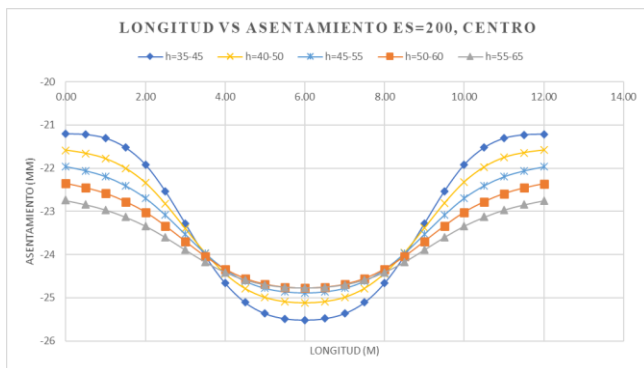


Figura 22: Perfil de asentamiento 7 Niveles, $E_s = 200 \text{ kg/cm}^2$, Edificación A, luces de 4 metros.

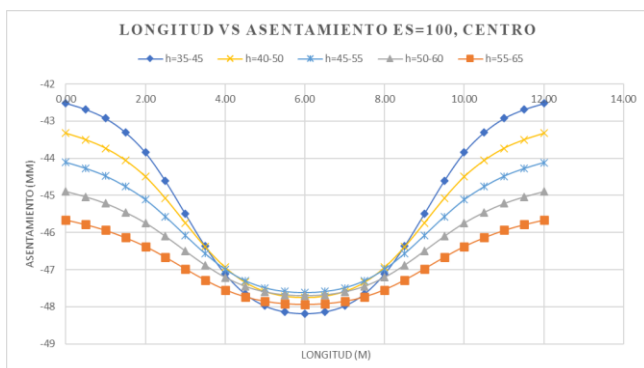


Figura 23: Perfil de asentamiento 7 Niveles, $E_s = 100 \text{ kg/cm}^2$, Edificación A, luces de 4 metros.

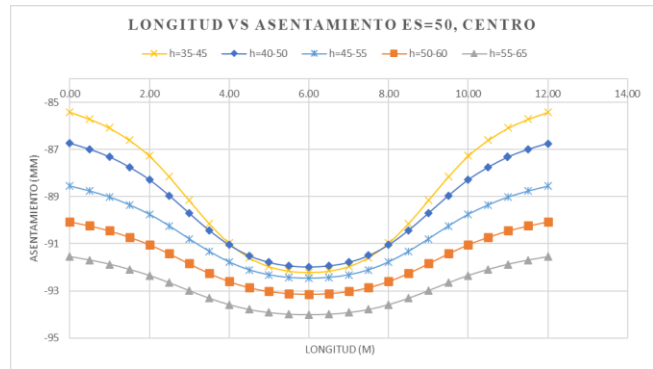


Figura 24: Perfil de asentamiento 7 Niveles, $E_s = 50 \text{ kg/cm}^2$, Edificación A, luces de 4 metros.

En las figuras 21, 22, 23 y 24 se observan los perfiles de asentamiento que revelan el comportamiento de flexibilidad de las losas de cimentación. Se constata la necesidad de mantener un comportamiento compensado entre la flexibilidad de la losa de cimentación y a la rigidez del suelo. Para una misma altura de losa, en situaciones donde se exhibe un suelo blando, la losa de cimentación tiende a mostrar un comportamiento más rígido. En contraste, en presencia de un suelo más rígido, las losas de cimentación adoptan una conducta más flexible.

El análisis del perfil de asentamiento en la figura 21 revela que la losa de cimentación de menor altura presenta una mayor flexibilidad en comparación con la losa de mayor altura, especialmente cuando se considera un coeficiente de balasto de 0.416 kg/cm^3 (suelo rígido). Por otro lado, al examinar el perfil de asentamiento en la figura 24 se evidencia que, incluso con un suelo blando y un coeficiente de balasto de 0.0521 kg/cm^3 (suelo blando), la losa de cimentación presenta un comportamiento rígido. Esto es notable a pesar de que la losa de menor espesor presenta un mayor porcentaje de asentamiento en este escenario.

EDIFICACIÓN B:

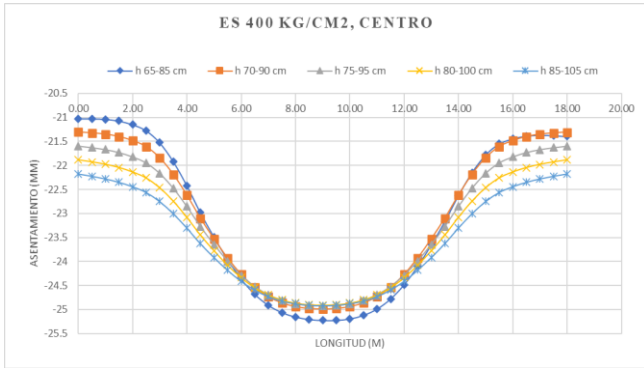


Figura 25: Perfil de asentamiento 7 Niveles, Es= 400 kg/cm², Edificación B, luces de 6 metros.

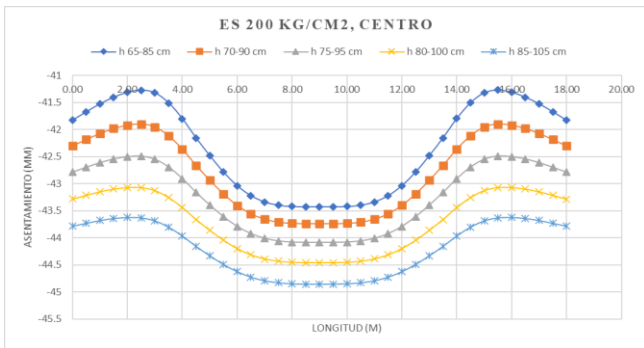


Figura 26: Perfil de asentamiento 7 Niveles, Es= 200 kg/cm², Edificación B luces de 6 metros.

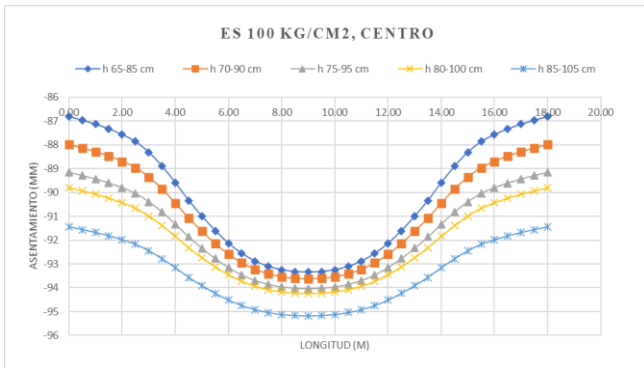


Figura 27: Perfil de asentamiento 7 Niveles, Es= 100 kg/cm², Edificación B luces de 6 metros.

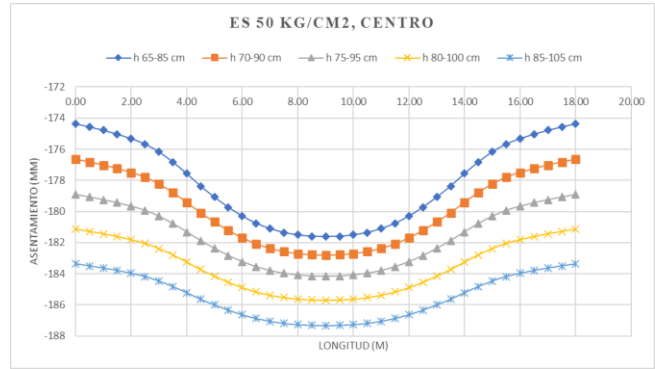


Figura 28: Perfil de asentamiento 7 Niveles, Es= 50 kg/cm², Edificación B luces de 6 metros.

Para la edificación con luces entre columnas de 6 metros, en las representaciones gráficas numeradas como 25, 26, 27 y 28 se visualizan los perfiles de asentamiento que ofrecen información sobre la respuesta en flexión de las losas de cimentación. Se verifica la necesidad de realizar un diseño geotécnico estructural donde exista un comportamiento compensado entre la rigidez del suelo y la flexibilidad de la losa de cimentación. En aquellas situaciones donde el suelo exhibe mayor deformabilidad, la losa de cimentación manifiesta un comportamiento rígido. En contraposición, cuando se encuentra en presencia de un suelo más rígido, las losas de cimentación adoptan una comportamiento más flexible, de modo que es similar ala edificacion con luces entre columnas de 4 m.

El análisis del perfil de asentamiento en la figura 25 revela que la losa de cimentación de menor altura presenta una mayor flexibilidad en comparación con la losa de mayor altura, especialmente al considerar un coeficiente de balasto de 0.277 kg/cm³ (suelo rígido). Por otro lado, al examinar el perfil de asentamiento en la figura 26, se pone de manifiesto que, incluso en presencia de un suelo blando y un coeficiente de balasto de 0.0347 kg/cm³, la losa de cimentación exhibe un comportamiento rígido. Esto es notable a pesar de que la losa de menor espesor muestra un porcentaje de asentamiento más elevado en este escenario particular.

3.4. Análisis de distorsión angular

En el análisis de la estructura con luces de 4 metros y 3 niveles de altura, se recopilaron los datos más relevantes sobre la distorsión angular. Entre estos, se destacan aquellos asociados a un coeficiente de balasto de 0.0521 kg/cm^3 (suelo blando) y una altura de losa de cimentación de 25 cm. En este escenario, se observó la máxima distorsión angular, alcanzando un valor de 0.00124. Por otro lado, al variar exclusivamente el coeficiente de balasto a 0.4167 kg/cm^3 (suelo rígido), la distorsión angular se redujo a 0.00032, manteniendo un comportamiento rígido.

En el análisis correspondiente a una edificación de 6 metros entre columnas, pero con la misma cantidad de niveles (3) y con una altura de losa de 45 cm, se registró una distorsión angular de 0.001879 con un coeficiente de balasto de 0.0347 kg/cm^3 (suelo blando). Al incrementar el coeficiente de balasto a 0.277 kg/cm^3 , la distorsión angular correspondiente disminuyó a 0.000598. Los resultados obtenidos, en concordancia con los límites previamente establecidos y al examinar las gráficas de los perfiles de deformación del suelo, clasifican a estas losas como rígidas. A pesar de que muestran tendencias hacia el límite del rango de losa en transición, se confirma que, con un suelo más blando y una mayor altura de losa de cimentación, esta se comporta como rígida. En contraste, con un suelo más rígido y una menor altura de losa de cimentación, la losa tiende a comportarse de manera más flexible.

En el análisis de la estructura con luces de 4 metros y 7 niveles de altura, se recopilaron los datos relativos a la distorsión angular. Para un coeficiente de balasto de 0.0521 kg/cm^3 y una altura de losa de cimentación de 55 cm, se identificó la máxima distorsión angular, alcanzando un valor de 0.00095. Por otro lado, al modificar exclusivamente el coeficiente de balasto a 0.4167 kg/cm^3 , se logró reducir la distorsión angular a 0.00058, manteniendo comportamientos de flexibilidad similares.

En la edificación de 6 metros entre columnas y 7 niveles, se registró una distorsión angular máxima de 0.000989 con un coeficiente de balasto de 0.0347 kg/cm^3 . Al aumentar el coeficiente de balasto a 0.277 kg/cm^3 , la distorsión angular correspondiente disminuyó a 0.00055. De manera similar, se observa que estas losas de cimentación exhiben un comportamiento más rígido en comparación con las anteriores con luces de 4 metros entre columnas debido a que las alturas de losas de cimentación son mayores en la edificación con luces de 6 metros.

La normativa ACI 336.2R-88 y el parámetro utilizado para determinar si el comportamiento de una losa de cimentación como rígida o flexible se basan en la relación $1.75/\beta$. En la formulación del ACI, se recomienda que el comportamiento flexible de la losa de cimentación defina un intervalo dentro del cual se establezca la rigidez en transición de la cimentación. Esto implica la necesidad de establecer factores específicos de acuerdo con la luz entre columnas en cada caso de análisis. Estos factores se determinarían mediante el siguiente procedimiento.

$$Lc = \frac{X}{\beta} \quad (15)$$

de la igualdad anterior despejamos X

$$X = Lc * \beta \quad (16)$$

Donde:

X: factor

Lc: luz entre columnas

β : parámetro del ACI 336.2R-88

El factor esta entre un rango de 0.85 a 0.9 y está sujeto a diversas condiciones y variaciones que afectan su consistencia, de modo que, al analizar este parámetro, se observó que abarca un rango considerablemente amplio en cuanto a las alturas de las losas de cimentación. Este rango es tan extenso que incluso algunas losas

que cumplen con el criterio de comportamiento rígido, al ser modeladas en el software SAFE, muestran comportamiento flexible o de transición de rigidez, indicando que el parámetro $1.75/\beta$ posee un margen considerable al caracterizar una losa como rígida, sin tener en cuenta su comportamiento deformacional.

En contraste, mediante el enfoque de análisis de distorsión angular, establecemos límites más ajustados. Estos límites se fundamentan en los perfiles de deformación experimentados por la losa de cimentación, ofreciendo así una caracterización más estricta en relación con el comportamiento deformacional de la losa de cimentación.

3.5. Análisis de porcentaje de asentamiento

Otro criterio determinante para clasificar la cimentación como rígida o flexible implica el análisis del porcentaje de asentamiento, aunque el enfoque es algo ambiguo ya que los asentamientos diferenciales menores difieren con los asentamientos diferenciales mayores. Al examinar los porcentajes de asentamientos, se observa una relación inversamente proporcional con la distorsión angular. En otras palabras, a menor distorsión angular corresponde un mayor porcentaje de asentamiento, y viceversa. Este fenómeno se ilustra con datos recopilados de una estructura de 3 niveles, con luces de 4 metros entre columnas y un coeficiente de balasto de 0.0521 kg/cm^3 . En este escenario, se registró un porcentaje de asentamiento del 96%. Al variar el coeficiente de balasto a 0.4167 kg/cm^3 , el porcentaje de asentamiento disminuyó a 85%, manteniendo una altura de losa de cimentación de 50 cm.

Cuando se aumenta el número de niveles a 7, elevando la altura de la losa de cimentación a 55 cm y manteniendo constantes los coeficientes de balasto en 0.0521 kg/cm^3 y 0.4167 kg/cm^3 , se obtuvieron porcentajes de asentamiento del 98% y 89%, respectivamente.

Este mismo patrón se reproduce en el análisis de una estructura con luces de 6 metros entre columnas. Para un coeficiente de balasto de 0.0347 kg/cm^3 , se registró un porcentaje de asentamiento del 94%, mientras que con un coeficiente de balasto de 0.277 kg/cm^3 , el porcentaje de asentamiento se redujo a 80%, manteniendo una altura de losa de cimentación de 65 cm.

Cuando se mantiene la longitud de las luces entre columnas en 6 metros, pero se aumenta el número de niveles a 7, se obtienen porcentajes de asentamiento del 98% y 91% para los coeficientes de balasto de 0.0347 kg/cm^3 y 0.277 kg/cm^3 , respectivamente. En ambos casos, se mantiene una altura de losa de cimentación de 85 cm.

Estos porcentajes demuestran que la losa exhibe un comportamiento más rígido en presencia de un suelo más blando y, en contraste, muestra un comportamiento más flexible en suelos más rígidos.

4. Conclusiones

La normativa ACI 336.2R-88, que utiliza el parámetro $1.75/\beta$ para clasificar las losas como rígidas o flexibles, es conservador ya que considera varios parámetros entre los cuales están las alturas de losas de cimentación y la magnitud de luces entre columnas. Esta amplitud conduce a discrepancias entre la clasificación teórica y el comportamiento observado en el software SAFE, donde algunas losas catalogadas como rígidas manifiestan comportamiento de transición de rigidez.

En contraposición, nuestro enfoque de análisis basado en la distorsión angular establece límites ajustados. La distorsión angular menor a 0.002 se considera una losa de cimentación como rígida, mientras que aquellas con distorsiones angulares entre 0.002 y 0.003 se clasifican como losas de cimentación en transición de rigidez, y aquellas que superan el límite de 0.003 se consideran flexibles. Además, al considerar los porcentajes de

asentamiento, se determina que para porcentajes superiores al 70%, la losa se clasifica como rígida, mientras que en el rango de 70% a 50% se considera en transición y por debajo del 50%, la losa se cataloga como flexible. Este enfoque no garantiza una caracterización más fiable del comportamiento deformacional de las losas de cimentación ya que los asentamientos de menor magnitud difieren con los asentamientos de mayor magnitud.

En el análisis de las combinaciones de tipos de suelos, características de cimentación y espesores de losas para diversas condiciones estructurales, se destacan cuatro coeficientes de balasto y cinco espesores de losas correspondientes. En particular, se observa que la edificación A, con 7 niveles, adopta una configuración de losa maciza, reflejando dos espesores distintos. De manera análoga, la edificación B, con 5 y 7 niveles, mantiene la misma configuración de losa maciza para asegurar el cumplimiento de la condición de corte por punzonamiento en estas cimentaciones. En todas las instancias, se constata que el menor espesor de cimentación en cada nivel no satisface la condición de corte por punzonamiento. Este enfoque se implementa estratégicamente como punto de referencia para identificar el umbral a partir del cual el espesor de la losa de cimentación cumple con la mencionada condición.

El análisis de las solicitaciones por columnas en la estructura revela una variación sustancial en las cargas transmitidas a través de los elementos de soporte. Las columnas centrales presentan la mayor magnitud de solicitaciones debido a un área colaborante superior, mientras que las de borde experimentan una disminución del 50%. Las columnas de esquina muestran una solicitación aún menor, aproximadamente una cuarta parte del área colaborante de las centrales. Esta variación se atribuye a la distribución diferencial de cargas a lo largo de la estructura en específico al área colaborante. La importancia de considerar esta distribución en el análisis estructural destaca la necesidad de evaluar minuciosamente el diseño y dimensionamiento de los elementos de soporte para garantizar un comportamiento estructural eficiente y adecuado.

Los análisis comparativos muestran que las losas de cimentación exhiben comportamientos de flexibilidad distintos en función de la naturaleza del suelo. En terrenos más blandos, las losas tienden a comportarse de manera más rígida, mientras que, en suelos más rígidos, su comportamiento tiende a ser más flexible. Este patrón se confirma al variar la altura de la losa, donde una mayor altura contribuye a un comportamiento rígido, y viceversa. Este comportamiento es consistente a través de diferentes configuraciones de la edificación.

La investigación pone de manifiesto una relación inversamente proporcional entre la distorsión angular y el porcentaje de asentamiento. En el caso específico de una edificación de tres pisos con una luz entre columnas de 4 metros, este fenómeno se evidencia al variar el coeficiente de balasto de 0.0521 kg/cm^3 a 0.4167 kg/cm^3 , donde una menor distorsión angular se correlaciona con un mayor porcentaje de asentamiento y viceversa. Este comportamiento es consistente a través de diferentes configuraciones de la edificación, destacando la importancia de considerar la distorsión angular como un indicador clave en el diseño de una losa de cimentación.

Referencias

- [1] ACI Committee “336.2R-88 Suggested Analysis and Design Procedures for Combined Footings and Mats”. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [2] ACI Committee 318 (ACI 318, 05/2019) “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (Reapproved 2022)”. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI 48331 USA.
- [3] Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC 2015) “NEC-SE-GC Geotecnia y Cimentaciones” Quito, Ecuador.

- [4] Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC 2015) “NEC-SE-DS Peligro Sísmico Parte 1” Quito, Ecuador.
- [5] Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC 2015) “NEC-SE-HA Hormigón Armado” Quito, Ecuador.
- [6] D. Lozano, K Pilco, “Comportamiento sísmico de zapatas aisladas y vigas de cimentación sobre suelos blandos y rígidos utilizando el programa Midas GTS NX” Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, 2022.
- [7] J. Patzán, “Guía práctica para el cálculo de capacidad de carga en cimentaciones superficiales, losas de cimentación, pilotes y pilas perforadas” Trabajo de graduación, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2009.
- [8] J. Olmedo, “Implementación de programas computacionales para el cálculo y diseño de cimentaciones superficiales aplicación al cálculo de edificios” Trabajo de Graduación, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2013.
- [9] H. Esqueda Oliva, S. Botello Rionda, y J. C. Leal Vaca, “Aplicación del Método de los Elementos Finitos en la Simulación de Cimentaciones Superficiales”, *Acta Univ.*, vol. 15, núm. 2, pp. 29–42, 2005.
- [10] H. Donini, R. Orlor, “Plateas de Hormigón Armado” *Nobuko*, 1ª ed., Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 2015.
- [11] E. Chagoyén, A. Negrín, M. Cabrera, L. López, y N. Padrón, “Diseño óptimo de cimentaciones superficiales rectangulares. Formulación”, *Rev. Constr.*, vol. 8, núm. 2, pp. 60–71, 2009.
- [12] J. de la Colina Martínez y H. Ramírez de Alba, “La ingeniería estructural”, *CIENC. Ergo Sum*, vol. 7, núm. 2, 2000.
- [13] J.-A. Pineda-Jaimes, C.-A. García-Ubaque, and R.-E. Esquivel-Ramírez, “Assessment of Geotechnical Hazard due to Deep Excavations in Bogota Clays: A Contribution for Sustainability in Urban Environments,” *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 29 (54), e11373, 2020.
- [14] J. Salas, “Geotecnia y Cimentaciones III Cimentaciones, Excavaciones y Aplicaciones de la Geotecnia” *Editorial Rueda*, Primera Parte, Madrid, España, 19
- [15] B. Das, “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica” *Cengage Learning Editores S.A.*, Cuarta Edición, 2001-
- [16] J. A. A. Zapata, “Breve resumen del Coeficiente de Balasto”, [En línea], *Estructurando*, 26 de octubre del 2015.