

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DEL
ASENTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES SOBRE
SUELO GRANULAR**

**Trabajo de investigación para la obtención del grado académico de BACHILLER EN CIENCIAS
CON MENCIÓN EN INGENIERÍA CIVIL**

AUTORES

Renzo Martín Ramírez Gonzáles

Giancarlo Alva Melgarejo

Alexis Bernabé Falcón Cabrera

Pamela Polo Huamán

Erika Estefany Ortega Ramos

John Steven Anaya Infantes

ASESOR:

Juan Pablo Zamora Beyk

Lima, Julio, 2020

RESUMEN

Para el diseño de cimentaciones superficiales en suelos granulares es necesario controlar el asentamiento que pueden sufrir estas por acción de las cargas aplicadas. Por lo tanto, el problema geotécnico referido al cálculo de este parámetro se vuelve importante, y es necesario enfocarlo desde diversos puntos de vista en cuanto al método de solución a utilizar. Hoy en día, existen diversos métodos con los cuales es posible estimar el asentamiento de cimentaciones superficiales en suelos granulares, cada uno de estos con sus propias consideraciones, tanto en los parámetros de entrada que se utilizan como en el procedimiento de cálculo. En esta investigación, se analiza comparativamente los valores de asentamiento de una zapata cuadrada de 1m de lado cimentada en un estrato de suelo granular, ubicado en el distrito de La Molina en Lima, obtenidos empleando cinco métodos analíticos (Elástico, Meyerhof, Terzaghi y Peck, Parry y Burland & Burbridge) y el método computacional utilizando el programa de elementos finitos Plaxis 2D (con el modelo constitutivo Mohr - Coulomb), considerando variaciones progresivas en las cargas aplicadas. De esta forma, se definen las principales diferencias entre los métodos estudiados, los cuales se refieren a la definición de parámetros de entrada, procedimiento de cálculo y la complejidad de la solución. Asimismo, se precisan tendencias en cuanto a la coincidencia entre los métodos analíticos con el computacional, teniendo en cuenta las diversas variables mencionadas anteriormente.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Justificación	2
1.3 Alcance	2
1.4 Objetivos.....	3
1.5 Metodología.....	3
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Métodos analíticos	4
2.1.1 Método elástico	4
2.1.2 Método de Terzaghi y Peck.....	7
2.1.3 Método de Meyerhof.....	8
2.1.4 Método de Parry	9
2.1.5 Método de Burland y Burbidge	12
2.2 Método computacional.....	14
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	16
3.1 Parámetros del suelo	16
3.2.1 Número de golpes.....	17
3.2.2 Módulo de elasticidad	17
3.2.3 Coeficiente de Poisson	18
3.2 Aplicación de los métodos	18
3.2.1 Método elástico	19
3.2.2 Método de Terzaghi y Peck.....	21
3.2.3 Método de Meyerhof.....	22
3.2.4 Método de Parry	23
3.2.5 Método de Burland & Burbidge	25
3.2.6 Método computacional	26
3.3 Análisis y Discusión de Resultados	30
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	35
4.1. Conclusiones.....	35
4.2. Recomendaciones	36
Referencias bibliográficas.....	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Variación de I_f

Figura 2.2: Esquema para la corrección por nivel freático

Figura 2.3: Factor por corrección de excavación según Parry

Figura 2.4: Factor de corrección CT por espesor T del material

Figura 3.1: Representación del perfil del suelo en Plaxis 2D

Figura 3.2: Definición de los parámetros de los estratos en el Plaxis 2D

Figura 3.3: Modelado de la zapata y el punto de aplicación de carga en plaxis 2D

Figura 3.4: Proceso de discretización en el Plaxis 2D

Figura 3.5: Definición de fases de cálculo en el Plaxis 2D

Figura 3.6: Configuración deformada del suelo como respuesta a la aplicación de una carga de 15 ton

Figura 3.7: Mapa de calor que muestra las deformaciones del suelo en respuesta a la aplicación de una carga de 15 ton

Figura 3.8: Relación q_{ap} vs asentamientos de los métodos estudiados

Figura 3.9: Relación q_{ap} vs asentamientos para cargas menores a 1kg/cm^2 (100KN/m^2)

Figura 4.1: Relación entre el asentamiento al final de la construcción de zapatas sobre arena y el ancho de la zapata, para arenas con resistencias de penetración estándar N60 entre 26 y 60 (después de Burland y Burdidge 1985)

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Parámetros para el cálculo del asentamiento en diferentes partes de la cimentación

Tabla 2.2: Ecuaciones para a corrección del número de golpes (N_{60})

Tabla 3.1: Número de golpes obtenidos mediante el ensayo SPT corregidos (N_{60})

Tabla 3.2: Perfil del suelo y otros parámetros

Tabla 3.3: Rango de valores típicos de la relación de Poisson

Tabla 3.4: Cargas empleadas en el cálculo de asentamientos

Tabla 3.5: Asentamientos

Tabla 3.6: Parámetros

Tabla 3.7: Parámetros para el cálculo de asentamientos en el centro de la zapata

Tabla 3.8: Variación de I_f con D_f/B B/L y $u=0.3$

Tabla 3.9: Asentamientos calculados al aplicar el método de Terzaghi y Peck

Tabla 3.10: Asentamientos calculados con el método de Meyerhof

Tabla 3.11: Asentamiento calculado para diferentes cargas empleando el método de Parry

Tabla 3.12: Asentamientos obtenidos al aplicar el método de Burland & Burbidge

Tabla 3.13: Resultados de los asentamientos obtenidos al emplear Plaxis 2D

Tabla 3.14: Resumen de los asentamientos obtenidos con todos los métodos estudiados

Tabla 3.15: Comparación de parámetros del suelo necesarios para los cálculos

Tabla 3.16: Resultados de los asentamientos para cargas aplicadas menores a 1 kg/cm^2

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1 Introducción

En toda edificación es menester definir el tipo de cimentación que transmitirá las cargas de la estructura al suelo. Esta puede ser cimentación superficial o profunda. En particular, el Artículo 5.26 de la Norma Técnica Peruana E0.50 define como cimentación superficial: “aquella en la cual la relación Profundidad/Ancho es menor o igual a 5”. Es así que existen varios tipos de este tipo de cimentaciones tales como zapatas aisladas, zapatas corridas, zapatas combinadas y losas de cimentación.

En cuanto al diseño de las zapatas, uno de los parámetros más importantes a considerar es la estimación del asentamiento sobre el terreno debido a la aplicación de cargas provenientes de la estructura. El asentamiento es la deformación vertical que sufre el suelo por acción de una carga vertical debido al reacomodo de las partículas que lo componen y a la expulsión del agua dentro de la matriz del mismo (Marquez y Quintero, 2014). La estimación del asentamiento es calculable tanto para suelos granulares (arenas) como para cohesivos (arcillas); diferentes autores han propuesto sus propios métodos que involucran consideraciones que se deben de tomar en cuenta para el cálculo y formas de calcular dicho parámetro.

En el presente trabajo, se busca estudiar cinco métodos de cálculo de asentamientos en suelos granulares, describirlos y compararlos. Para ello se presentará un ejemplo de cálculo del asentamiento de una zapata por medio de los cinco métodos, luego se comparará dichos resultados con el cálculo realizado mediante un método computacional.

1.2 Justificación

Para el diseño de la cimentación en cualquier tipo de suelo es necesario que la presión admisible cumpla dos condiciones: en primer lugar, el asentamiento que se produce por las cargas transmitidas a la cimentación debe ser menor a la admisible; y, en segundo lugar, la rotura del suelo por corte debe tener un factor de seguridad adecuado (Lee y Salgado, 2002). En particular, el diseño de cimentaciones en suelos granulares es determinado por la primera condición, puesto que el asentamiento producido es inmediato a diferencia del asentamiento en suelos cohesivos (Terzaghi et al., 1996). De acuerdo a Terzaghi et al. (1996), es difícil estimar los asentamientos que se producirán con precisión dada la complejidad que existe para determinar el comportamiento de los suelos; sin embargo, su cálculo es necesario para tener al menos una idea de qué factores lo condicionan. Este hecho ha promovido la investigación en este campo, por lo cual, en la actualidad, contamos con múltiples métodos para determinar los asentamientos en suelos granulares (Das y Sivakugan, 2007). Es así que, en este trabajo de investigación, se propone el estudio de cinco métodos usados comúnmente en el cálculo de asentamientos en suelos granulares.

1.3 Alcance

La presente investigación consiste en evaluar la variación del cálculo del asentamiento de una zapata sobre suelo granular por medio de cinco métodos diferentes: el método elástico, Meyerhof, Terzaghi y Peck (Prueba de carga), Parry y Burland & Burbridge. Para ello, se analiza un perfil de suelo típico para todos los casos, el cual fue obtenido a partir de una exploración de campo de un terreno ubicado en el distrito de La Molina, provincia de Lima. En términos generales, el perfil de suelo de este terreno está conformado por tres estratos distintos (Arena arcillosa SC, Arena mal gradada SP y Arena mal gradada SP) y una capa superficial de topsoil; además, durante la exploración no se encontró la napa freática. Asimismo, el análisis comparativo de los cinco métodos analíticos se limitará a 4 indicadores para determinar el más adecuado. Finalmente, se compara este método con los resultados del método computacional obtenidos del software Plaxis 2D, el cual emplea el modelo constitutivo Mohr-Coulomb.

1.4 Objetivos

El objetivo general de esta investigación es comparar cinco métodos analíticos de cálculo de asentamientos sobre un suelo granular.

Objetivos específicos:

- Describir los siguientes cinco métodos para el cálculo de asentamientos en suelos granulares: Elástico, Meyerhof, Terzaghi y Peck, Parry y Burland & Burbridge
- Calcular el asentamiento de una zapata empleando cada método para diferentes cargas aplicadas
- Determinar la variación de los asentamientos ante diferentes cargas para cada uno de los métodos
- Comparar los métodos analíticos en base a los siguientes criterios: cantidad de parámetros utilizados en los cálculos y facilidad de aplicabilidad
- Comparar los resultados de los métodos analíticos con el método computacional desarrollado en el software Plaxis 2D. haciendo uso del modelo constitutivo Mohr-Coulomb

1.5 Metodología

El procedimiento a seguir en el presente trabajo de investigación se trata básicamente de calcular el asentamiento de una zapata cuadrada de 1x1m, para diferentes cargas, usando los métodos: Elástico, Meyerhof, Terzaghi y Peck, Parry y Burland & Burbridge.

El suelo presente en el proyecto consta de tres estratos distintos y una capa superficial de limo arcilloso. En primera instancia, se definen los parámetros de cada suelo ya que esto nos permitirá realizar los cálculos utilizando los cinco métodos diferentes

Luego, se compara los resultados obtenidos analíticamente con el método computacional; para ello, utilizaremos el software Plaxis 2D empleado el modelo constitutivo Mohr Coulomb.

CAPÍTULO 2. Revisión de literatura

En este capítulo, se exponen los principales métodos analíticos encontrados para el cálculo de asentamiento en suelos granulares y se describe el procedimiento a seguir para obtener el asentamiento con cada uno de estos métodos. Asimismo, se realiza una breve descripción de lo que son los métodos de elementos finitos con especial énfasis al método computacional elegido en esta investigación.

2.1 Métodos analíticos

2.1.1 Método elástico

En esta primera sección se detalla el procedimiento necesario para calcular el asentamiento elástico basado en la teoría de la elasticidad. Cabe resaltar que el asentamiento elástico depende del módulo de elasticidad del suelo y de la rigidez de la cimentación. Es así que, para desarrollar este método, es necesario puntualizar algunos conceptos de la Mecánica de Suelos y de la Ingeniería Geotécnica, respectivamente. En primer lugar, los suelos granulares suelen tener un asentamiento inmediato o instantáneo. Asimismo, debido a heterogeneidad de las propiedades del suelo, su módulo la elasticidad varía con la profundidad (Das, 2015, pp.521). En segundo lugar, se puede asumir una cimentación flexible o rígida, lo cual determinará el perfil de asentamiento debajo de la cimentación poco profunda.

Braja M. Das (2015) presenta una ecuación para determinar el asentamiento de una cimentación perfectamente flexible, la cual está sometida a una fuerza neta por unidad de área igual a q_0 . Esta es:

$$S_e = q_0 * (\alpha B') * \frac{1 - \mu_s^2}{E_s} * I_s * I_f$$

Donde:

$q_0 =$ presión neta aplicada sobre la cimentación

$\mu_s =$ coeficiente de Poisson para el suelo

$E_s =$ módulo de elasticidad promedio del suelo debajo de la cimentación
medida desde $z = 0$ hasta $z = 4B$

Debido a la variación de este parámetro con la profundidad, se recomienda usar un valor ponderado usando la siguiente ecuación presentada por Bowles en “Elastic Foundation Settlement on Sand Deposits” (1987):

$$E_s = \frac{\sum E_{s(i)} \Delta z}{z^*}$$

Donde:

$E_{s(i)} =$ módulo de elasticidad del suelo dentro de la profundidad Δz

$z^* = H$ o $5B$, el menor valor

$B' = \frac{B}{2}$ para el centro de la cimentación, B para la esquina de la cimentación

$I_s =$ factor de forma (Steinbrenner, 1934) $= F1 + \left(\frac{1 - 2\mu_s}{1 - \mu_s} \right) F2$

$$F1 = \frac{1}{\pi} (A_0 + A_1)$$

$$F2 = \frac{n'}{2\pi} \tan^{-1} A_2$$

$$A_0 = m' \ln \frac{(1 + \sqrt{m'^2 + 1}) \sqrt{m'^2 + n'^2}}{m' (1 + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1})}$$

Tabla 2.1: Parámetros para el cálculo del asentamiento en diferentes partes de la cimentación

Parámetro	Para el cálculo del asentamiento en el centro de la cimentación	Para el cálculo del asentamiento en la esquina de la cimentación
A	4	1
m'	L/B	L/B
n'	H/(B/2)	H/B

$$A_1 = \ln \frac{(m' + \sqrt{m'^2 + 1})\sqrt{1 + n'^2}}{m' + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}}$$

$$A_2 = \frac{m'}{n\sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}}$$

$$I_f = \text{factor de profundidad (Fox, 1948)} = f\left(\frac{D_f}{B}, \mu \text{ y } \frac{L}{B}\right)$$

Los valores de este parámetro están definidos en la siguiente figura.

Tabla 17.5 Variación de I_f con D_f/B , B/L y μ_s

μ_s	D_f/B	B/L		
		0.2	0.5	1.0
0.3	0.2	0.95	0.93	0.90
	0.4	0.90	0.86	0.81
	0.6	0.85	0.80	0.74
	1.0	0.78	0.71	0.65
0.4	0.2	0.97	0.96	0.93
	0.4	0.93	0.89	0.85
	0.6	0.89	0.84	0.78
	1.0	0.82	0.75	0.69
0.5	0.2	0.99	0.98	0.96
	0.4	0.95	0.93	0.89
	0.6	0.92	0.87	0.82
	1.0	0.85	0.79	0.72

Figura 2.1: Variación de I_f

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica

α = factor que depende de la ubicación de la cimentación en donde el asentamiento está siendo calculado

Por otro lado, este autor especifica que para una cimentación rígida el asentamiento se determina usando la siguiente ecuación.

$$S_{e(\text{rígida})} = 0.93S_{e(\text{flexible, centro})}$$

2.1.2 Método de Terzaghi y Peck

El método propuesto por Terzaghi y Peck está para cimientos poco profundos, para asentamientos totales no mayores a 25 mm (1 pulg.) y para asentamientos diferenciales no mayores a 19 mm (3/4 pulg) (Lutenegger, 1995).

$$s = \left(\frac{8q}{N}\right) (C_w C_d) \quad \text{para } B \leq 4\text{ft.}$$

$$s = \left(\frac{12q}{N}\right) \left(\frac{B}{B+1}\right)^2 (C_w C_d) \quad \text{para } B > 4\text{ft.}$$

$$s = \left(\frac{12q}{N}\right) (C_w C_d) \quad \text{para plateas}$$

Se pueden expresar de manera general en la siguiente ecuación:

$$s = \left(\frac{3q}{N}\right) (2B/(B+1))^2 (C_w C_d)$$

Donde:

s = Asentamiento (en pulgadas)

q = Carga aplicada (en tsf)

N = Número de golpes sin corregir

B = Ancho de cimiento

C_w = Corrección por agua

$$= 2 - \left(\frac{W}{2B}\right) \leq 2.0 \quad \text{para zapata en superficie}$$

$$= 2 - 0.5 \left(\frac{D}{2B}\right) \leq 2.0 \quad \text{para zapata sumergidas}$$

C_d = Corrección por inserción

$$= 1 - 0.25 \left(\frac{D}{B}\right)$$

W = Nivel de la napa freática

D = Profundidad de cimentación

El número de golpes del ensayo SPT es utilizado para el cálculo de asentamientos, sin embargo, es necesario utilizar la corrección necesaria si se presenta dentro del estrato arena densa, saturada, fina y/o limosa. Se tiene la ecuación de corrección:

$$N_c = 15 + 0.5(N - 15) \text{ para } N > 15$$

2.1.3 Método de Meyerhof

Meyerhof en 1956, para la carga aplicada en cimentaciones superficiales, propuso la resistencia a la penetración estándar utilizando N_{60} con la siguiente relación (Das, 2012):

$$q_{neta} = \bar{q} - \gamma D_f$$

Donde: \bar{q} = esfuerzo sobre la cimentación

Según esta teoría para 25mm (1 pulg) de asentamiento máximo se tiene lo siguiente:

$$q_{neta} \left(\frac{kN}{m^2} \right) = \frac{N_{60}}{0.08} \text{ (para } B \leq 1.22 \text{ m)}$$

$$q_{neta} (kN/m^2) = \frac{N_{60}}{0.125} \left(\frac{B + 0.3}{B} \right)^2 \text{ (para } B > 1.22 \text{ m)}$$

A lo largo del tiempo después de que diversos investigadores utilizaran las fórmulas, se llega a la conclusión de que los resultados tienden a ser conservadores, por lo que en 1965 Meyerhof sugirió que la presión de carga admisible neta se deba incrementar en un 50% quedando de la siguiente manera:

$$q_{neta} (kN/m^2) = \frac{N_{60}}{2.5} F_d \left(\frac{s_e}{25} \right) \text{ (para } B \leq 1.22 \text{ m)}$$

$$q_{neta} (kN/m^2) = \frac{N_{60}}{0.08} \left(\frac{B + 0.3}{B} \right)^2 F_d \left(\frac{s_e}{25} \right) \text{ (para } B > 1.22 \text{ m)}$$

Se define:

$$F_d = \text{Factor de profundidad} = 1 + 0.33(D_f/B)$$

$$s_e = \text{asentamiento en, mm}$$

$B =$ ancho de cimentación, en metros

$$s_e = \frac{1.25q_{neto}(kN/m^2)}{N_{60}F_d} \quad (\text{para } B \leq 1.22 \text{ m})$$

$$s_e = \frac{2q_{neto}(kN/m^2)}{N_{60}F_d} \left(\frac{B}{B + 0.3} \right)^2 \quad (\text{para } B > 1.22 \text{ m})$$

2.1.4 Método de Parry

El método planteado por Parry presenta una ecuación similar a algunos métodos para el cálculo de asentamientos sobre suelo granular. Usando tres factores, el asentamiento sobre un suelo granular queda expresado a partir de la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{\alpha \cdot q \cdot B}{N} \cdot C_D \cdot C_w \cdot C_T$$

Donde:

δ = asentamiento (mm)

α = constante ($\alpha = 200$)

q = presión aplicada (MN/m²)

B = ancho de fundación (m)

N = valor promedio de N medido en el SPT

C_D = factor de incidencia por la excavación (contrario al factor de empotramiento)

C_w = factor de incidencia de $N.F$

C_T = factor de espesor de la capa compresible

Respecto al número de golpes se tiene en cuenta lo siguiente:

- Si N varía consistentemente con la profundidad, se tiene:

N = valor promedio de los valores a $\frac{3}{4} B$, bajo el nivel de la fundación (refleja la zona de influencia de la zapata)

- Si los valores de N no son consistentes con la profundidad, este se obtiene como:

$$N = \frac{3N_1 + 2N_2 + N_3}{6}$$

Donde:

3N1= es el promedio entre nivel de fundación y $Z = \frac{3}{4}.B$ (mayor influencia cerca a la Zapata)

2N2= Es el promedio entre $z = \frac{3}{4}.B$ y $z = \frac{3}{2}.B$

N3 = promedio entre $z = \frac{3}{2}.B$ y $z = 2B$

La corrección por el nivel freático, se determina, cuando corresponda, a partir de las siguientes expresiones:

- Para $0 < D_w < D_f$

$$C_w = 1 + \frac{2 D_f - D_w}{D_f + \frac{3}{4} B}$$

- Si $D_f < D_w < 2B$

$$C_w = 1 + \frac{D_w(2B + D_f - D_w)}{2B(D_f + 0.75B)}$$

- SI $D_w = 2B + D_f$

$$C_w = 1$$

- $D_w = D_f$

$$C_w = 1 + D_f / (D_f + 0.75B)$$

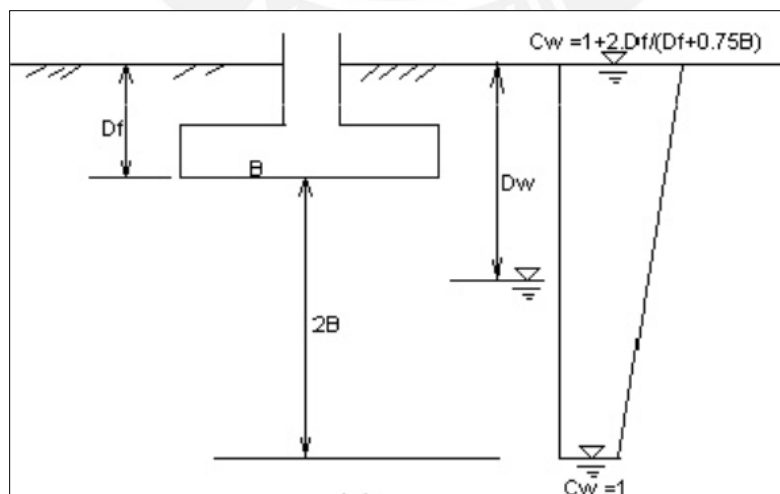


Figura 2.2: Esquema para la corrección por nivel freático

Fuente: Universidad de los andes- Asentamiento en suelos granulares

La Figura 2.3, presenta el factor de corrección por excavación (CD) en el que se aprecia que a mayor empotramiento mayor es el asentamiento. Con este factor se considera, que la excavación para la fundación altera los esfuerzos en el terreno. Para cimientos superficiales o excavaciones completamente rellenas se utilizará $CD = 1$.

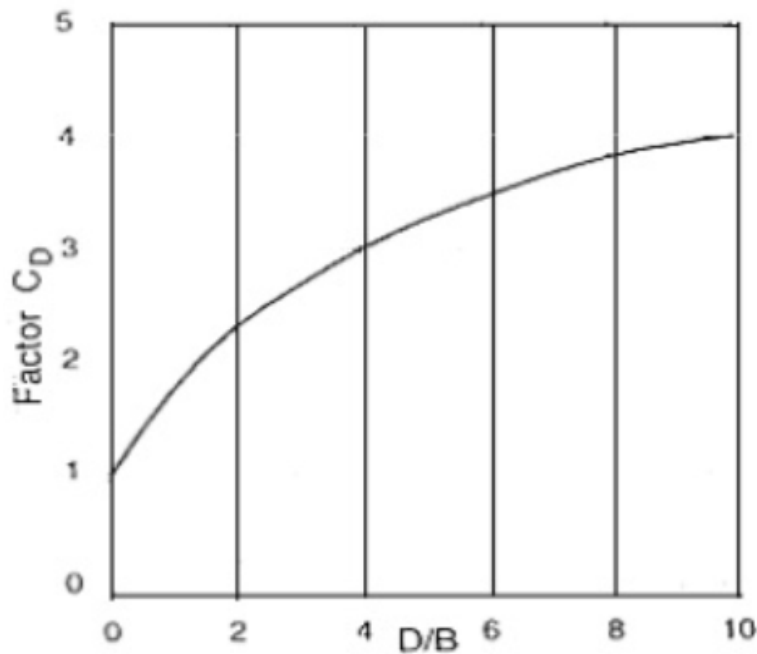


Figura 2.3: Factor por corrección de excavación según Parry

Fuente: Universidad de los andes- Asentamiento en suelos granulares

La Figura 2.4, presenta el factor de corrección por la compresibilidad del material de fundación, donde toma en cuenta el espesor T de la capa de arena compresible, bajo la fundación. Esta curva es obtenida de acuerdo a que la $1/2$ del asentamiento ocurre en $z = 3/4 B$ y la otra $1/2$ del asentamiento entre $z = 3/4 B$ y $z=2B$

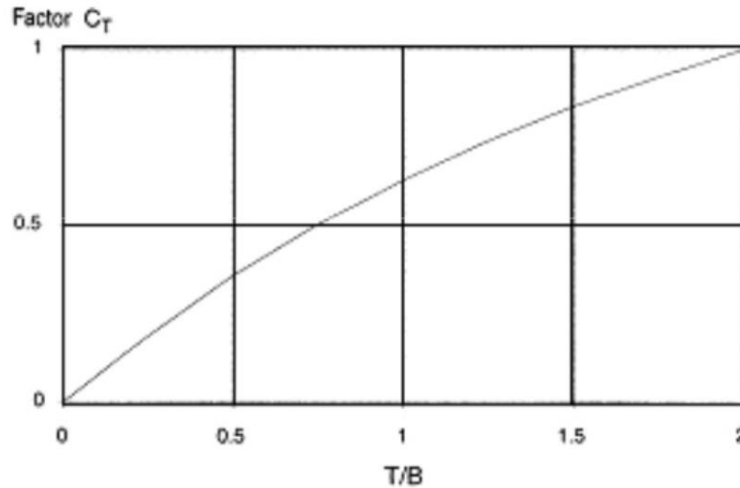


Figura 2.4: Factor de corrección CT por espesor T del material

Fuente: Universidad de los andes- Asentamiento en suelos granulares

2.1.5 Método de Burland y Burbidge

El método propuesto por Burland y Burbidge para el cálculo de asentamiento de cimentaciones superficiales sobre suelos granulares es de tipo empírico (Lutenegger, 1995). Esto ya que su planteamiento se basó en el análisis estadístico de más de 200 registros de asentamientos observados en diferentes estructuras cimentadas sobre gravas y arenas (Burland & Burbidge, 1985). Además de esto, y al igual que los procedimientos propuestos por Meyerhof o Terzaghi y Peck, este método emplea los resultados del ensayo de penetración estándar (SPT).

La base de este método es la relación empírica, entre el número de golpes del SPT (N), el ancho de la zapata (B) y la compresibilidad del suelo, que determinaron Burland y Burbidge (1985) a partir de un análisis de regresión de los registros de asentamiento. Esta relación, que se define como índice de compresibilidad (I_c), toma en cuenta que la profundidad de influencia de la zapata (Z_i) es aproximadamente $B^{0.7}$ y está dada por la siguiente expresión:

$$I_c = \frac{1.71}{\overline{N}_{60}^{1.4}}$$

donde: \overline{N}_{60} = número de golpes promedio en la zona de influencia de la zapata sin corrección por confinamiento

Estos autores recomiendan la corrección del número de golpes (N_{60}) propuesta por Terzaghi y Peck para arenas finas y limosas debajo del nivel freático cuando $N_{60} > 15$. Y, en el caso de gravas y gravas arenosas, recomiendan un incremento de N_{60} en 25%. A continuación, se muestran las ecuaciones a emplear en la corrección de N en la aplicación de este método.

Tabla 2.2: Ecuaciones para a corrección del número de golpes (N_{60})

Arenas finas y limosas bajo N.F. con $N > 15$	$N' = 15 + 0.5(N_{60} - 15)$
Gravas y gravas arenosas	$N' = 1.25 N_{60}$

De acuerdo a Burland y Burbidge (1985), el asentamiento para suelos normalmente consolidados se estima a partir de la siguiente ecuación:

$$\rho_i = q' \times B^{0.7} \times I_C$$

donde: ρ_i = asentamiento instantáneo en mm

q' = presión efectiva de la cimentación en kN/m^2

B = ancho de la cimentación en m

En el caso de suelos preconsolidados, el asentamiento se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Si: } q' > \sigma'_{vo} \rightarrow \rho_i = \left(q' - \frac{2}{3} \sigma'_{vo} \right) \times B^{0.7} \times I_C$$

$$\text{Si: } q' < \sigma'_{vo} \rightarrow \rho_i = q' \times B^{0.7} \times \frac{I_C}{3}$$

donde: σ'_{vo} = presión de preconsolidación

Las fórmulas descritas previamente son aplicables para cimentaciones cuadradas por lo que es necesario aplicar un factor de corrección de forma (f_s) para los otros tipos de zapatas. Además, si el espesor de la capa de suelo granular (H_s) es menor a la profundidad de influencia de la zapata (Z_i) será necesario aplicar el factor de corrección por espesor de la capa de suelo granular (f_l). Estos factores de corrección se muestran a continuación:

$$f_s = \left[\frac{1.25L/B}{(L/B) + 0.25} \right]^2$$

$$f_i = \frac{H_s}{Z_i} \left(2 - \frac{H_s}{Z_i} \right)$$

donde: L = largo de zapata en m

Finalmente, los autores de este método señalan que debe comprobarse que el factor de seguridad de falla por corte debe ser mayor a 3, caso contrario no se cumplirá la relación lineal y este método subestimaré el asentamiento.

2.2 Método computacional

El método de elementos finitos (MEF) es un método numérico que permite la resolución de problemas ingenieriles de alta complejidad (Ortiz et al, 2013). Apareció en el campo de la geotecnia como una alternativa de solución diferente a la de los métodos analíticos convencionales, y actualmente es considerado como la herramienta de análisis más conveniente y precisa para ingenieros y científicos. (Cier, 2016). Como la mayoría de los métodos numéricos, el método de elementos finitos ha alcanzado un gran desarrollo gracias a los avances computacionales, por lo cual también se le considera como un método computacional.

La manera en que el método de elementos finitos llega a la solución del problema consiste, inicialmente, en separar un campo formado por un número infinito de puntos, por un número finito de elementos que el usuario considere suficiente bajo sus criterios, que da lugar a una malla formada de elementos discretos interconectados entre sí por uniones específicas denominadas nodos (Navarro y Perez, 2009).

Luego de ello, se asume que la variable de campo (desplazamientos, tensiones, etc.) en el interior de cada elemento puede expresarse en función de la variable de campo en los nudos del elemento; y posteriormente, se plantea las ecuaciones de campo para el continuo y se resuelve con la idea de obtener los valores de la variable de campo en los nudos. Una vez conocidos dichos valores, se puede determinar de manera aproximada, los valores de la variable de campo en el interior del elemento, y posteriormente, pasar a describir el comportamiento global a través del ensamblaje de los elementos (Nápoles et al, 2015).

Existen diferentes programas computacionales que se basan en el método de elementos finitos para aplicaciones geotécnicas. En este caso, dado que PLAXIS es el paquete de elementos finitos más

difundido y utilizado por empresas consultoras en ingeniería, institutos de investigación, universidades y constructoras (Team Brief, 2009), se optó por utilizarla como herramienta computacional en el presente trabajo de investigación para obtener valores de asentamiento que posteriormente serán comparados con los resultados obtenidos del cálculo por medio de los métodos analíticos presentados anteriormente.

De manera más específica, en esta investigación se emplea PLAXIS 2D que, como se mencionó antes, es un programa computacional que utiliza el método de elemento finitos. Este es capaz de realizar análisis de la tensión y deformación del suelo sometido a cargas drenadas y no drenadas, y problemas de flujo de agua asociados a estas. Para realizar el análisis, este programa requiere conocer los parámetros geotécnicos del suelo según el modelo constitutivo a utilizar y las cargas aplicadas sobre este (Brinkgreve et al, 2004).

En este caso, se vio por conveniente emplear el modelo constitutivo Mohr –Coulomb que es uno de los tantos modelos con los que puede trabajar el PLAXIS 2D. Este es un modelo elastoplástico perfecto que considera un comportamiento isotrópico del suelo, lo cual surge a partir de la Ley de Hook y del criterio de falla de Mohr-Coulomb. Este modelo determina el límite del comportamiento elástico y plástico de un suelo a partir de funciones de fluencia. Estas funciones son representadas por un campo en forma de cono hexagonal. Es así que los puntos que constituyen la superficie corresponden al rango de comportamiento elástico del suelo. En cambio, cuando los esfuerzos igualan o superan esta superficie, se presentan deformaciones tanto elásticas como plásticas. Por otro lado, “el comportamiento elastoplástico perfecto en este modelo es formulado a partir de la relación entre los dos tipos de deformaciones (tasa de deformación elásticas y plásticas) mediante la aplicación de la ley de Hooke en su forma clásica” (Nieto et al, 2009).

El modelo de Mohr-Coulomb es uno de los más simples de usar dado que requiere solo cinco parámetros de entrada: El módulo de elasticidad, la relación de Poisson, la cohesión del suelo, el ángulo de fricción interna y el ángulo de dilatancia del suelo. Sin embargo, su simpleza también acarrea ciertas limitaciones. Wlufsohn y Adams (Citado en Gonzales et al 2013) sostienen este modelo ignora los efectos del esfuerzo principal intermedio, muestra predicciones conservadoras de la resistencia cortante del suelo y no es conveniente en aplicaciones tridimensionales. Asimismo, se sobreestima la dilatancia del suelo debido a la teoría de plasticidad que emplea y es incapaz de reproducir los cambios de rigidez del suelo (Nieto et al, 2009).

CAPÍTULO 3. Desarrollo de la investigación

En esta sección, se detallará el desarrollo de la presente investigación, esta se basa íntegramente en el cálculo de los asentamientos en un suelo granular con los diferentes métodos descritos en el capítulo anterior. Además de esto, se procederá a comentar y discutir los principales resultados que se han obtenido a lo largo de este trabajo.

3.1 Parámetros del suelo

El suelo empleado en la presente investigación está conformado por tres estratos distintos y una capa superficial de topsoil compuesto de limo arcillosos de un espesor de 0.20. Por debajo de la capa superficial de limo, se ubica un estrato de arena arcillosa (SC) de baja plasticidad de color marrón oscuro, en un estado ligeramente húmedo. Este estrato se encuentra ubicado entre los 0.20 m hasta los 1.30 m de profundidad y posee una compacidad relativa del tipo suelto. A partir del 1.30 m de profundidad y hasta los 3.00 m, se encuentra un estrato de suelo arenoso mal gradado (SP). Este estrato, que posee un color marrón claro, se encuentra ligeramente húmedo y posee una compacidad de tipo medianamente densa. Finalmente, se encuentra un estrato de arena mal gradada (SP) ligeramente gravosa de color marrón oscuro. Este estrato se ubicó a partir de los 3.00 m de profundidad en estado húmedo y con una compacidad relativa del tipo medianamente densa

Para el cálculo de los asentamientos de acuerdo a los métodos mencionados en el capítulo anterior, es necesario definir o calcular algunos parámetros previamente. Estos parámetros, que serán presentados a continuación, son el número de golpes (N), el módulo de Young o elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson (ν).

3.2.1 Número de golpes

A continuación, se muestra los resultados del ensayo SPT del suelo empleado en este estudio y el número de golpes corregidos por energía, longitud de barra (N60).

Tabla 3.1: Número de golpes obtenidos mediante el ensayo SPT corregidos (N60)

Profundidad de inicio (m)	Prof.+0.3 (m)	SUCS	N			N60		
			P-1	P-2	P-3	P-1	P-2	P-3
0.50	0.80	SC	14	13	14	10.00	9.29	10.00
1.75	2.05	SP	26	28	26	20.24	21.79	20.24
3.00	3.30	SP	30	30	29	25.27	25.27	24.43
4.25	4.55	SP	31	30	31	28.05	27.14	28.05

3.2.2 Módulo de elasticidad

Braja M. Das (2015) señala que el Es debe ser determinado como el valor ponderado de los módulos de elasticidad de los suelos desde la profundidad de cimentación hasta 4B. Para ello, se presenta el perfil de suelo bajo el cual se realizará el análisis en la Tabla 3.2. Cabe resaltar que la profundidad es de 1.5m y el valor de 4B es igual a una profundidad de 4.9m desde la superficie, por lo cual se determina el Es tomando en cuenta el segundo y tercer estrato.

Por otro lado, se empleará la fórmula de Bowles (1988) para determinar el módulo de elasticidad de cada estrato Es (i), para lo cual se emplea el N del ensayo SPT.

$$E \left(\frac{kg}{cm^2} \right) = 10 * (7.5 + 0.5 * N_{SPT})$$

Tabla 3.2: Perfil del suelo y otros parámetros

Estrato	Profundidad (m)	Perfil final	Nprom	Es (i) (kg/cm2)	Es (i) (kN/m2)	Δz (m)
Estrato 1	0.00 - 1.30	Arena arcillosa suelta (SC), color marrón oscuro, ligeramente húmeda	9.76	143.33	14061.00	1.30
Estrato 2	1.30 - 3.00	Arena mal gradada (SP), medianamente densa, color marrón claro, ligeramente húmeda	20.76	208.33	20437.50	1.70
Estrato 3	3.00 - 4.70	Arena mal gradada ligeramente gravosa (SP), medianamente densa, color marrón oscuro, húmeda	26.37	225.83	22154.25	1.70

El cálculo del módulo de elasticidad ponderado se realiza con la siguiente ecuación:

$$E_s = \frac{\sum E_s (i) * \Delta z}{z}$$

$$E_s = \frac{(20437.5 * 1.70 + 22154.2 * 1.70)}{3.2}$$

$$E_s = 22626.87 \text{ kN/m}^2$$

3.2.3 Coeficiente de Poisson

Este parámetro fue determinado tomando en cuenta la relación entre el tipo de suelo y el coeficiente de Poisson determinado por Kulhawy y Mayne (1990). Es así que se determinó un valor de 0.3 para el coeficiente de Poisson de los estratos de arena.

Tabla 3.3: Rango de valores típicos de la relación de Poisson
Fuente: Kulhawy & Mayne (1990) (Citado en Alvaro, C., 2016)

Suelo	Comportamiento	Relación de Poisson
Arcilla saturada	No drenado	0.5
Arcilla parcialmente saturada		0.2-0.4
Arena densa	Drenado	0.3-0.4
Arena suelta		0.1-0.3

3.2 Aplicación de los métodos

Para la aplicación de los métodos, se consideró una zapata cuadrada de 1m de lado con una profundidad de cimentación de 1.50m. Además de esto, se consideró la aplicación de las cinco cargas que se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Cargas empleadas en el cálculo de asentamientos

Qv(ton)	q _{ap} (ton/m ²)	q _{ap} (kN/m ²)
5	5	49.05
10	10	98.10
15	15	147.15
20	20	196.20
25	25	245.25

3.2.1 Método elástico

Los resultados de la aplicación del método elástico para el cálculo de asentamientos de la zapata mencionada líneas arriba se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.5: Asentamientos

ASENTAMIENTO CENTRO DE ZAPATA				
Qv(ton)	qap(ton/m2)	qap(kN/m2)	Se (m)	Se(mm)
5	5	49.05	0.00123	1.23
10	10	98.1	0.00245	2.45
15	15	147.15	0.00368	3.68
20	20	196.2	0.00490	4.90
25	25	245.25	0.00613	6.13

Asimismo, se presenta un resumen de los parámetros necesarios para el cálculo de los asentamientos.

Tabla 3.6: Parámetros

ZAPATA		SUELO		ASENT. CENTRO ZAPATA		PARÁMETROS	
B(m)	1	H(m)	3.20	B'asent. centro(m)	0.5	F1	0.464
L(m)	1	5B(m)	5	α asent. Centro	4	F2	0.024
Df(m)	1.5	Es(kN/m2)	22626.87	n'	6.4	Is	0.478
		μ	0.3	m'	1	If	0.65

A modo de ilustración, se muestra el procedimiento para determinar el asentamiento de la carga de 5 ton.

Suelo

- Presión neta aplicada sobre la cimentación:
Dado que se tiene una carga vertical de 30 ton y una zapata de dimensiones 2mx2m.

$$q_o = \frac{5 \text{ ton}}{1 \times 1} = 5 \text{ ton/m}^2$$

$$q_o = 49.05 \text{ kN/m}^2$$

Asentamiento en el centro de la zapata

Dado que se desea calcular el asentamiento en el centro de la zapata, se definen los siguientes parámetros.

Tabla 3.7: Parámetros para el cálculo de asentamientos en el centro de la zapata

Parámetro	Para el cálculo del asentamiento en el centro de la cimentación	Valor
B'	B/2	1
α	4	4
m'	L/B	1
n'	H/(B/2)	6.4

Parámetros para el cálculo

- Factor de forma I_s (Steinbrenner, 1934)

Este factor se determina con la siguiente fórmula:

$$I_s = F1 + \frac{1 - 2\mu}{1 - \mu} F2$$

$$I_s = F1 + \frac{1 - 2\mu}{1 - \mu} F2$$

$$I_s = 0.285 + \frac{1 - 2 * 0.3}{1 - 0.3} * 0.064$$

$$I_s = 0.322$$

F1 y F2 son determinados tomando en cuenta la tabla 17.3 y 17.4 del libro de Fundamento de Ingeniería Geotécnica (2015) de Braja M. Das, los cuales dependen de m' y n'. Es así que estos valores son:

$$F1=0.464$$

$$F2=0.024$$

- Factor de profundidad I_f

Este parámetro es determinado tomando en cuenta B/L de 1, un μ de 0.3 y un Df/B de 1.5. Dado que este valor no se encuentra establecido en la tabla, se usará el valor de 0.65 como el valor de la profundidad I_f .

Tabla 3.8: Variación de I_f con Df/B B/L y $\mu=0.3$
Fuente: Tabla 17.5 de Braja M. Das (2015)

Df/B	B/L		
	0.2	0.5	1.0
0.2	0.95	0.93	0.90
0.4	0.90	0.86	0.81
0.6	0.85	0.80	0.74
1.0	0.78	0.71	0.65

Cálculo del asentamiento

Se procederá a reemplazar los valores de la fórmula de asentamiento elástico. Tomar en cuenta que α toma el valor de 4 y B' es igual a $B/2$ cuando el asentamiento se determina en el centro de la cimentación.

$$Se = q_0(\alpha B') \frac{1 - \mu^2}{E_s} I_s * I_f$$

$$Se = 49.05(4 * 0.5) \frac{1 - 0.3^2}{22626.87} 0.478 * 0.65$$

$$Se = 0.00123 \text{ m}$$

$$Se = 1.23 \text{ mm}$$

3.2.2 Método de Terzaghi y Peck

En la Tabla 3.9, se muestran los resultados de la aplicación de este método para el cálculo de asentamientos de la zapata mencionada líneas arriba.

Tabla 3.9: Asentamientos calculados al aplicar el método de Terzaghi y Peck

Qv(ton)	qap(ton/m2)	Se(mm)
5	5	2.19
10	10	4.37
15	15	6.56
20	20	8.74
25	25	10.93

Al igual que en los casos anteriores, a continuación, se presenta el cálculo del asentamiento para la carga de 5ton. Para efectuar los cálculos desarrollados por Terzaghi y Peck es necesario aplicar la fórmula con los parámetros adecuados. En este caso en particular no se cuenta con saturación por napa freática por tal motivo no es necesaria dicha corrección.

$$q = 5 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2} = 0.46 \text{ tsf}$$

$$N = 27$$

$$B = 1 \text{ m} = 3.28 \text{ ft}$$

$$C_w = 1$$

$$C_d = 0.625$$

$$W = -$$

$$D_f = 1.5 \text{ m} = 4.92 \text{ ft}$$

$$S = \left(8 * \frac{0.46}{27} \right) * 1 * 0.625 = 0.086 \text{ pulg} = 2.18 \text{ mm}$$

3.2.3 Método de Meyerhof

Al aplicar el método desarrollado por Meyerhof para el cálculo de asentamiento, se obtuvieron los resultados mostrados, a continuación, en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10: Asentamientos calculados con el método de Meyerhof

Qv(ton)	qap(kN/m2)	Se(mm)
5	49.05	1.95
10	98.1	3.91
15	147.15	5.86
20	196.2	7.81
25	245.25	9.77

A continuación, se muestra el cálculo del asentamiento para la carga de 5ton aplicada sobre la zapata. Es necesario basarse completamente en el estudio de mecánica de suelos para la obtención de resultados coherentes y repetir el proceso con las cargas necesarias bajo estudio.

$$q = 5 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2} = 49.05 \text{ kN/m}^2$$

$$N_{60} = 21$$

$$B = 1 \text{ m}$$

$$D_f = 1.5 \text{ m}$$

$$F_d = 1 + 0.33 * 1.5/1 = 1.495$$

$$S = 1.25 * \frac{49.05}{21 * 1.495} = 1.953 \text{ mm}$$

3.2.4 Método de Parry

En este caso, en primer lugar, se muestra el cálculo del asentamiento para la carga de 5 ton.

- Presión aplicada (MN/m²)

$$q = \frac{Q_v}{A} = \frac{5 * 1000 * 9.81}{1 * 1 * 10^6} = 0.0491 \text{ MN/m}^2$$

- Ancho de fundación (m)

$$B = 1 \text{ m}$$

- Valor promedio de N del SPT

Como el valor de N varia consistentemente con la profundidad, tomamos el promedio a los $\frac{3}{4} B$, bajo la zona de cimentación

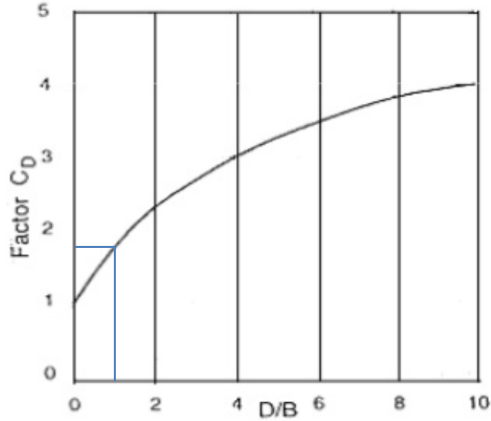
$$z = \frac{3}{4} * 1 = 0.75 \text{ m}$$

Como $D_f = 1.5 \text{ m}$, entonces el valor promedio para la profundidad de 1.5m a 2.25 m

$$N_{60\text{promedio}} = 20.76$$

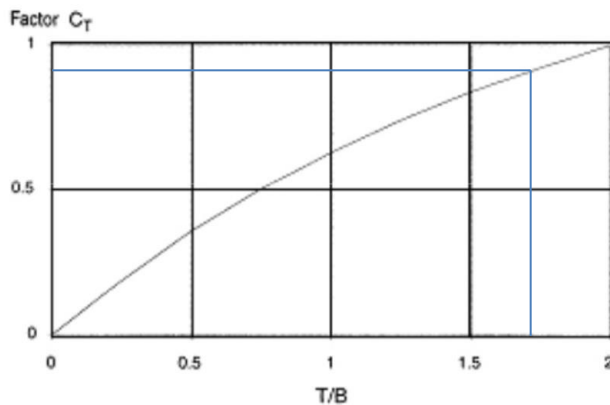
- Factor de incidencia por excavación

Conociendo $D_f = 1.5 \text{ m}$ y $B = 1 \text{ m}$, usamos el siguiente gráfico



Del gráfico, tenemos un valor $C_d = 1.875$

- Factor de corrección por nivel freático
Como $D_w > D_f$, entonces $C_w = 1$
- Factor de espesor C_T
Espesor de la capa compresible = $1.7\text{m} = T$
Entonces $T/B = 1$



Del gráfico, tenemos un valor $C_T = 0.89$

Reemplazando todos los valores en la ecuación principal, tenemos:

$$\delta = \frac{\alpha \cdot q \cdot B}{N} \cdot C_D \cdot C_w \cdot C_T = \frac{200 \times 0.0491 \times 1}{20.76} \times 1.875 \times 1 \times 0.89 = 0.789 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el asentamiento de la zapata, correspondiente a una carga aplicada $Q_v = 5$ ton, sería 0.789 mm.

A continuación, se presenta el asentamiento para las distintas cargas y los parámetros intermedios implicados en el cálculo de cada uno.

Tabla 3.11: Asentamiento calculado para diferentes cargas empleando el método de Parry

Qv (ton)	α	q (MN/m ²)	B (m)	N prom	Cd	Cw	CT	ρ (mm)
5	200	0,0491	1	20,76	1,875	1	0,89	0,789
10	200	0,0981	1	20,76	1,875	1	0,89	1,577
15	200	0,1472	1	20,76	1,875	1	0,89	2,366
20	200	0,1962	1	20,76	1,875	1	0,89	3,154
25	200	0,2453	1	20,76	1,875	1	0,89	3,943

3.2.5 Método de Burland & Burbidge

Al aplicar el método de Burland & Burbidge a la zapata mencionada al principio de este capítulo, se encontraron los asentamientos mostrados en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12: Asentamientos obtenidos al aplicar el método de Burland & Burbidge

Qv(ton)	qap(kN/m ²)	Se(mm)
5	49.05	1.20
10	98.1	2.40
15	147.15	3.60
20	196.2	4.80
25	245.25	6.00

A continuación, como ejemplo, se muestra el desarrollo del cálculo del asentamiento para la zapata estudiada para la carga vertical de 5 ton. Para el cálculo del asentamiento por este método, en primer lugar, se debe determinar la compresibilidad del suelo. Este valor se obtiene a partir del número de golpes promedio de la zona de influencia que en este caso es de 1m. Tomando en cuenta la profundidad de cimentación y el espesor de la zona de influencia, se tiene que el \overline{N}_{60} para este caso es de 20.76. Así, se tiene:

$$I_c = \frac{1.71}{\overline{N}_{60}^{1.4}} = \frac{1.71}{20.76^{1.4}} = 0.024$$

Considerando que el terreno se encuentra formado por arenas normalmente consolidadas ya que en este no han existido estructuras previas y se desconoce que en él se hayan ejercido presiones mayores a las actuales, el asentamiento se calcula de la siguiente forma:

$$\rho_i = q' \times B^{0.7} \times I_c$$

$$\rho_i = 49.03 \times 1^{0.7} \times 0.024$$

$$\rho_i = 1.20 \text{ mm}$$

Finalmente, ya que la zapata es cuadrada y el espesor de la capa de suelo granular es mayor a la zona de influencia, no es necesario aplicar ninguno de los factores de corrección mencionados en el capítulo anterior.

3.2.6 Método computacional

Para llevar a cabo el análisis por elementos finitos utilizando el Plaxis 2D, primero se tuvo que representar las condiciones del problema a analizar. Desde la ventana de Input del Plaxis 2D, específicamente en la pestaña “Soil”, es posible representar los estratos mediante un modelo bidimensional compuesto de líneas y puntos, además se permite especificar las propiedades del material que componen cada estrato según el modelo constitutivo a utilizar.

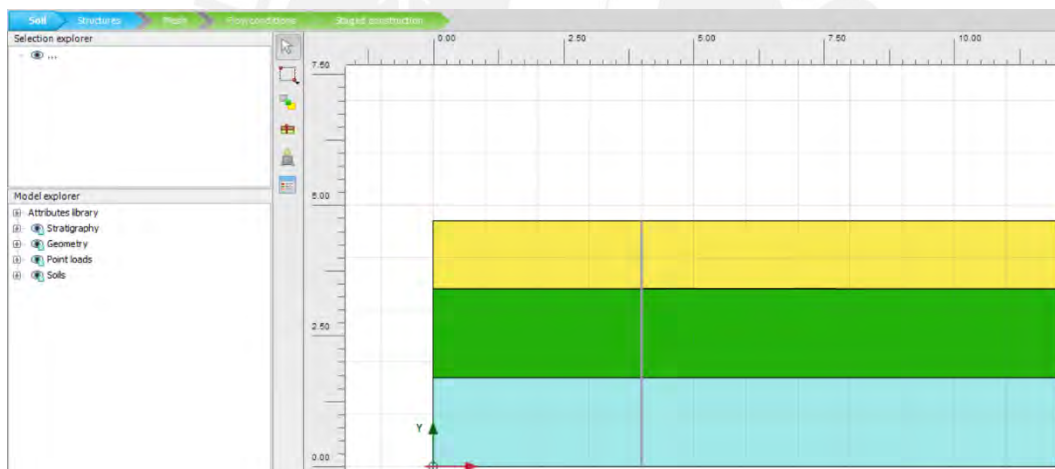


Figura 3.1: Representación del perfil del suelo en Plaxis 2D

Para el presente de trabajo de investigación se decidió utilizar como modelo de deformación el “Modelo Plain Strain” ya que la zapata a analizar es cuadrada, y como modelo constitutivo el “Modelo Mohr - Coulomb” dado que este modelo exige solo cinco parámetros básicos de entrada: Modulo de Young (E), módulo de Poisson (ν), la resistencia por cohesión del suelo (c), el ángulo de fricción interna (ϕ), y el ángulo de dilatación (Ψ). Estos parámetros se determinaron con facilidad utilizando correlaciones con el ensayo SPT.

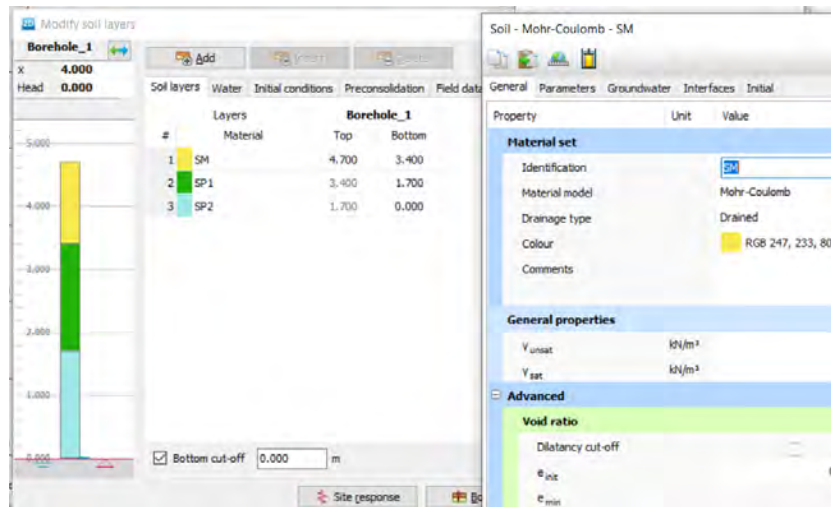


Figura 3.2: Definición de los parámetros de los estratos en el Plaxis 2D

Después de ingresar los parámetros del suelo al programa, en la pestaña “Structures” se procede a modelar la zapata como un “Soil polygon” y se crea un punto de aplicación de carga “point load”.

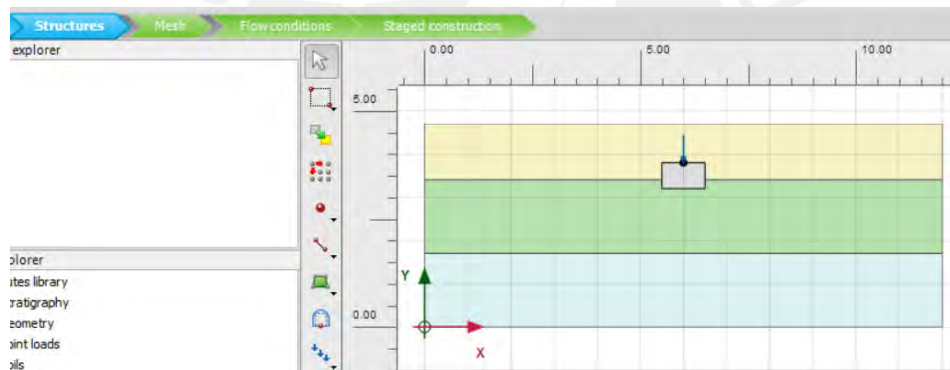


Figura 3.3: Modelado de la zapata y el punto de aplicación de carga en plaxis 2D

El paso final antes de realizar los cálculos es la generación del enmallado (Mesh), el cual consiste en discretizar tanto los estratos como la estructura creada en elementos triangulares conectadas entre sí.

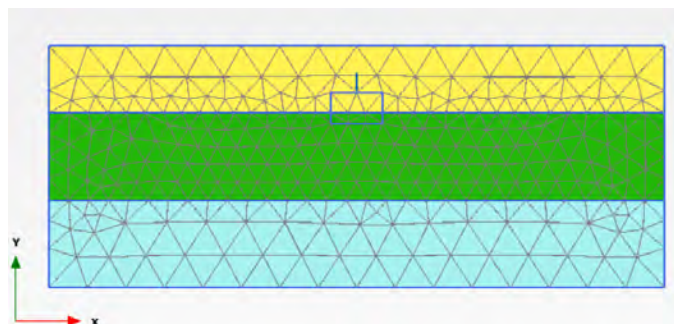


Figura 3.4: Proceso de discretización en el Plaxis 2D

Para el cálculo (Pestaña “Staged Construction”), el Plaxis 2D brinda la opción de separar en fases las condiciones de carga. Por simplicidad, se consideró una fase inicial, en el cual solo existe el suelo sin ningún tipo de estructura ni carga, y una segunda fase donde añade la zapata y se aplica la carga al mismo tiempo.



Figura 3.5: Definición de fases de cálculo en el Plaxis 2D

Una vez realizados los cálculos, en la ventana Output del Plaxis se pueden visualizar los valores de deformaciones y esfuerzos en forma tabulada y gráfica como se muestra en la Tabla 3.13 y en la Figura 3.6 y 3.7.

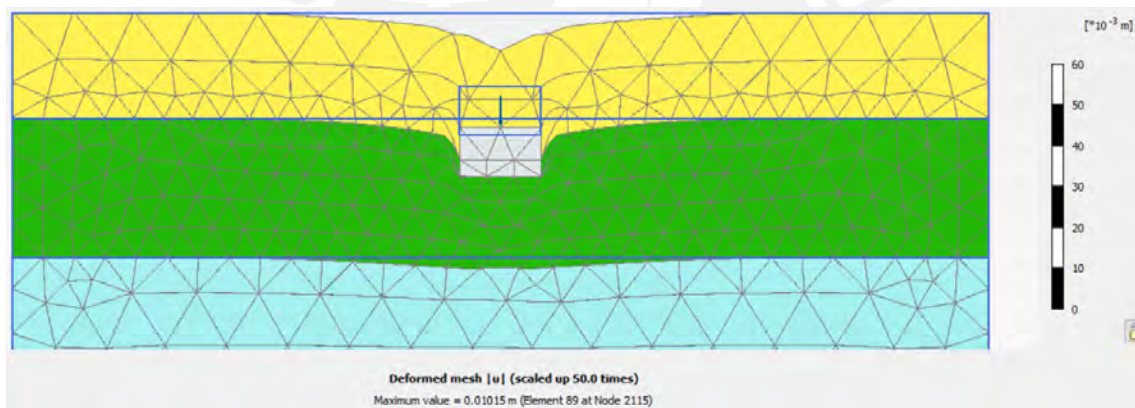


Figura 3.6: Configuración deformada del suelo como respuesta a la aplicación de una carga de 15 ton

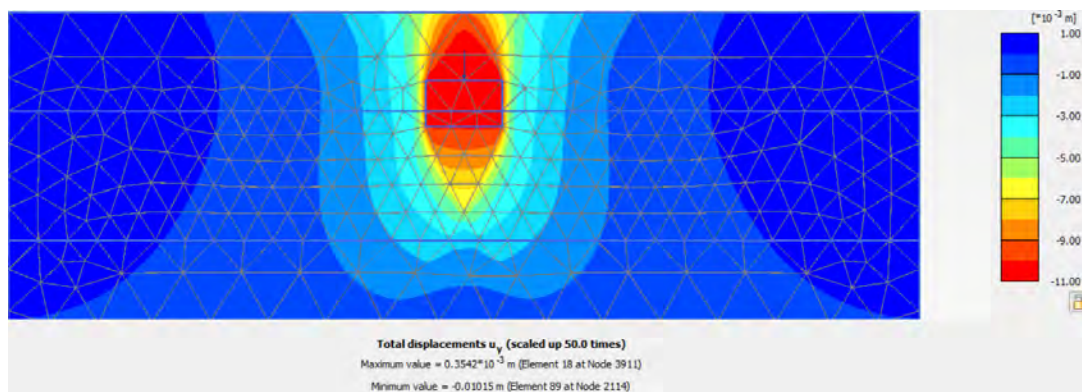


Figura 3.7: Mapa de calor que muestra las deformaciones del suelo en respuesta a la aplicación de una carga de 15 ton

Tabla 3.13: Resultados de los asentamientos obtenidos al emplear Plaxis 2D

Qv(ton)	qap(ton/m2)	qap(kN/m2)	Se(mm)
5	5	49.05	1.65
10	10	98.1	5.51
15	15	147.15	10.15
20	20	196.2	15.28
25	25	245.25	20.32

Cabe resaltar que los valores de asentamiento de obtenidos con el Plaxis guardarán cierto grado de inexactitud debido principalmente a dos fuentes de imprecisión. El primero es el uso del modelo Mohr – Coulomb, que a pesar de ser uno de los modelos más utilizado en la práctica geotécnica, es incapaz de reproducir adecuadamente los cambios de rigidez del suelo y modelar situaciones donde diferentes trayectorias de esfuerzos son experimentadas (Nieto et al, 2009). La segunda fuente de imprecisión es el uso de correlaciones con el SPT para determinar los parámetros resistentes del suelo, dado que estas son obtenidas a partir de experimentos en donde es imposible tener controladas todas las variables involucradas en él.

Finalmente, en la Tabla 3.14, se presenta un resumen de los resultados obtenidos aplicando cada uno de los métodos estudiados.

Tabla 3.14: Resumen de los asentamientos obtenidos con todos los métodos estudiados

Qv (ton)	qap (kN/m²)	qap (kg/cm²)	Plaxis 2D Se (mm)	M. Elástico Se (mm)	Terzaghi	Meyerhof Se (mm)	Burland	Parry Se (mm)
					& Peck Se (mm)		& Burbidge Se (mm)	
5	49.05	0.50	1.65	1.23	2.19	1.95	1.20	0.79
10	98.10	1.00	5.51	2.45	4.37	3.91	2.40	1.58
15	147.15	1.50	10.15	3.68	6.56	5.86	3.60	2.37
20	196.2	2.00	15.28	4.9	8.74	7.81	4.80	3.15
25	245.25	2.50	20.32	6.13	10.93	9.77	6.00	3.94

3.3 Análisis y Discusión de Resultados

Los resultados del cálculo de asentamiento de los 5 métodos analíticos estudiados en este trabajo y los obtenidos empleando Plaxis 2D se resumen en la Figura 3.8. A partir de estos resultados, se observa que los asentamientos obtenidos con cada uno de los métodos son bastantes similares para la carga de 5ton, la menor carga considerada en este análisis; sin embargo, a medida que se incrementó la carga, los resultados del Plaxis 2D variaron en gran medida respecto a aquellos calculados con los métodos analíticos.

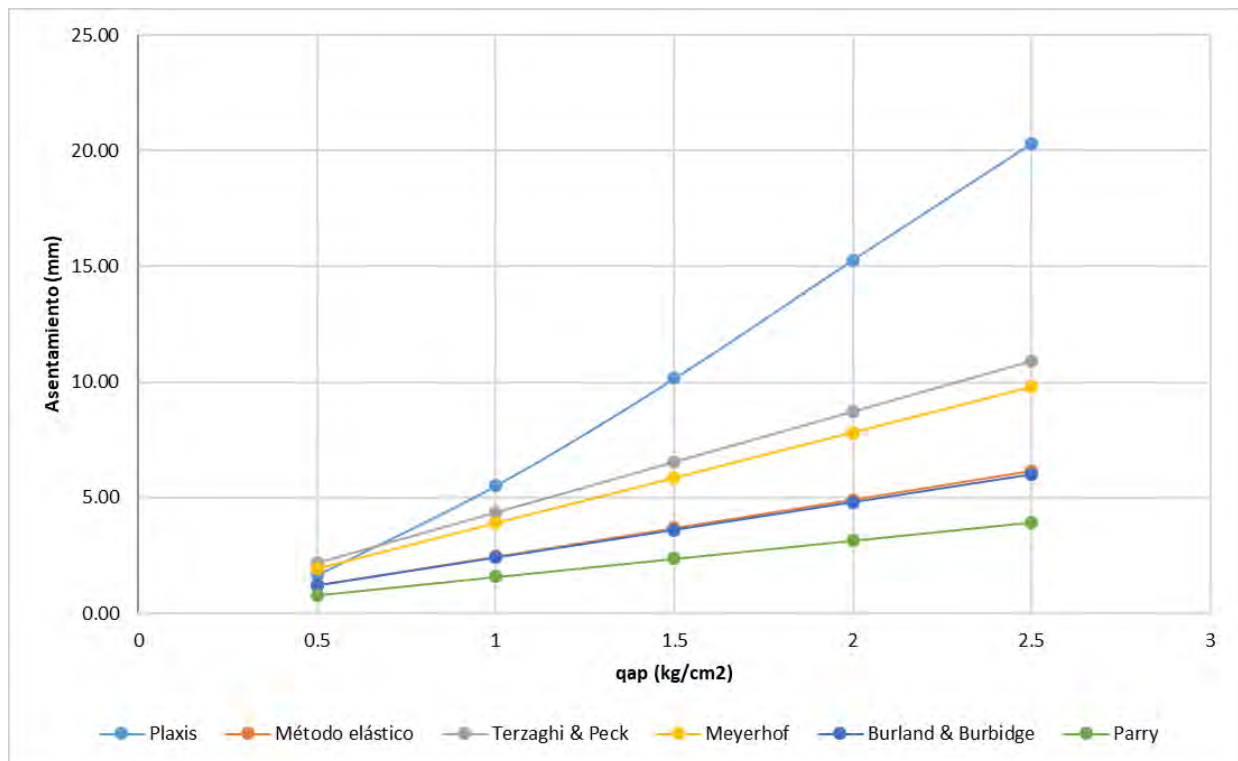


Figura 3.8: Relación qap vs asentamientos de los métodos estudiados

En esta figura, también se puede apreciar que los asentamientos calculados con el método Elástico y el método propuesto por Burland&Burbidge son muy similares para las diferentes cargas estudiadas. Esto podría deberse a que ambos métodos consideran las propiedades del suelo como un solo factor que incide sobre la carga aplicada y el ancho de la zapata para determinar el asentamiento. En el caso del método elástico, es necesario especificar el módulo de elasticidad ponderado, el coeficiente de Poisson y la profundidad de cimentación. Es así que en este método se establece una relación entre estos parámetros, resumiendo su efecto en un solo factor. Por otro lado, el método de Burland&Burdigde define el índice de compresibilidad basado en un análisis

estadístico de 200 estudios de cimentaciones, el cual resumiría las propiedades del suelo de forma empírica. La similitud de estos métodos sólo debería presentarse en el rango elástico del suelo.

Por otro lado, se identificaron particularidades en la metodología de cada método que, en ciertos casos, limitaron la confiabilidad de los resultados. En el caso del método de Parry se usan gráficos para obtener distintos parámetros; por ello, no es muy preciso el cálculo de asentamiento usando dicho método. Sin embargo, se toma como referencia ya que usa parámetros similares de distintos métodos que permiten calcular el asentamiento en suelos granulares. Asimismo, para la presente investigación, los resultados del modelamiento en Plaxis 2D y el Método Elástico tienen más incertidumbre debido a que los parámetros empleados en su cálculo han sido obtenidos de revisión de literatura y fórmulas empíricas. Es así que se obtendrían cálculos más certeros si se realizaran ensayos in situ o de laboratorio para determinar dichos parámetros, tales como el ensayo triaxial.

Una diferencia sustancial entre los métodos es el uso de diferentes parámetros del suelo en el cálculo. Tal es el caso que los parámetros utilizados por Terzaghi y Peck son bastante parecidos a los utilizados por Meyerhof y es por tal razón que los resultados que ambos métodos presentan son bastante parecidos. Lo planteado por Terzaghi y Peck difiere en el uso de la cantidad de número de golpes utilizado sin corregir. Meyerhof, por otra parte, toma en cuenta el valor de N₆₀ corregido por lo cual existe una disminución en los valores de los resultados. Por otro lado, el modelamiento por Plaxis 2D y el Método Elástico requieren determinar mayor cantidad de parámetros del suelo, a diferencia de los 4 restantes, los cuales solo necesitan el valor de N del ensayo SPT. De esta forma, los dos primeros métodos dependen en mayor medida de las propiedades del suelo como se puede verificar en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15: Comparación de parámetros del suelo necesarios para los cálculos

Parámetro	Plaxis 2D	M.Elástico	Terzaghi y Peck	Meyerhof	Burland & Burbidge	Parry
Módulo de elasticidad	Si	Si	No	No	No	No
Coefficiente de Poisson	Si	Si	No	No	No	No
Número de golpes (N)	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Ángulo de fricción	Si	No	No	No	No	No

Finalmente, cabe resaltar que solo algunos de los métodos existentes para el cálculo de asentamientos en suelos granulares consideran la forma de la zapata como un factor que altera el

asentamiento producido. En este caso, el método elástico y aquel planteado por Burland&Burbidge toman en consideración la relación existente entre la longitud y el ancho de la zapata; sin embargo, los métodos de Terzaghi&Peck, Meyerhoff y Parry no toman en cuenta relación alguna sobre la forma de la zapata. Esta podría ser otra razón por la que los asentamientos obtenidos al aplicar los dos primeros métodos son muy similares y, en cambio, difieren respecto a los resultados de los últimos.

También se comparó los resultados de asentamiento obtenidos por medio de los métodos ya presentados cuando el suelo se encuentra en estado elástico. Según las investigaciones de Kawakami y Ogawa (1996) un valor referencial de esfuerzo de fluencia experimental (σ_{yo}) para los suelos arenosos-arcillosos es de 1 kg/cm². Es por ello que se decidió calcular valores de asentamientos en la zapata para cargas aplicadas (qap) menores a 1 kg/cm² (100 KN/m²). Los resultados se muestran en la Tabla 3.16 y en la Figura 3.9.

Tabla 3.16: Resultados de los asentamientos para cargas aplicadas menores a 1 kg/cm²

Qv (ton)	qap (kN/m ²)	qap (kg/cm ²)	Plaxis 2D Se (mm)	M. Elástico Se (mm)	Terzaghi & Peck Se (mm)	Meyerho f Se (mm)	Burland & Burbidge Se (mm)	Parry Se (mm)
1.53	15.0	0.15	0.194	0.375	0.669	0.597	0.367	0.241
2.04	20.0	0.20	0.395	0.500	0.891	0.796	0.490	0.332
2.55	25.0	0.26	0.597	0.624	1.114	0.995	0.612	0.402
3.06	30.0	0.31	0.802	0.749	1.337	1.194	0.735	0.483
4.08	40.0	0.41	1.225	0.999	1.783	1.593	0.979	0.643
4.59	45.0	0.46	1.453	1.124	2.006	1.792	1.102	0.724
5.1	50.0	0.51	1.700	1.249	2.229	1.991	1.224	0.804
5.61	55.0	0.56	1.968	1.374	2.452	2.190	1.347	0.885
6.12	60.0	0.61	2.271	1.499	2.674	2.389	1.469	0.965
6.63	65.0	0.66	2.619	1.623	2.897	2.588	1.591	1.046
7.14	70.0	0.71	3.026	1.748	3.120	2.787	1.714	1.126
8.16	80.0	0.82	3.946	1.998	3.566	3.185	1.959	1.287
9.18	90.0	0.92	4.816	2.248	4.012	3.583	2.204	1.448
10.2	100.0	1.02	5.687	2.498	4.457	3.982	2.448	1.609
11.22	110.0	1.12	6.571	2.747	4.903	4.380	2.693	1.770
12.24	120.0	1.22	7.471	2.997	5.349	4.778	2.938	1.930

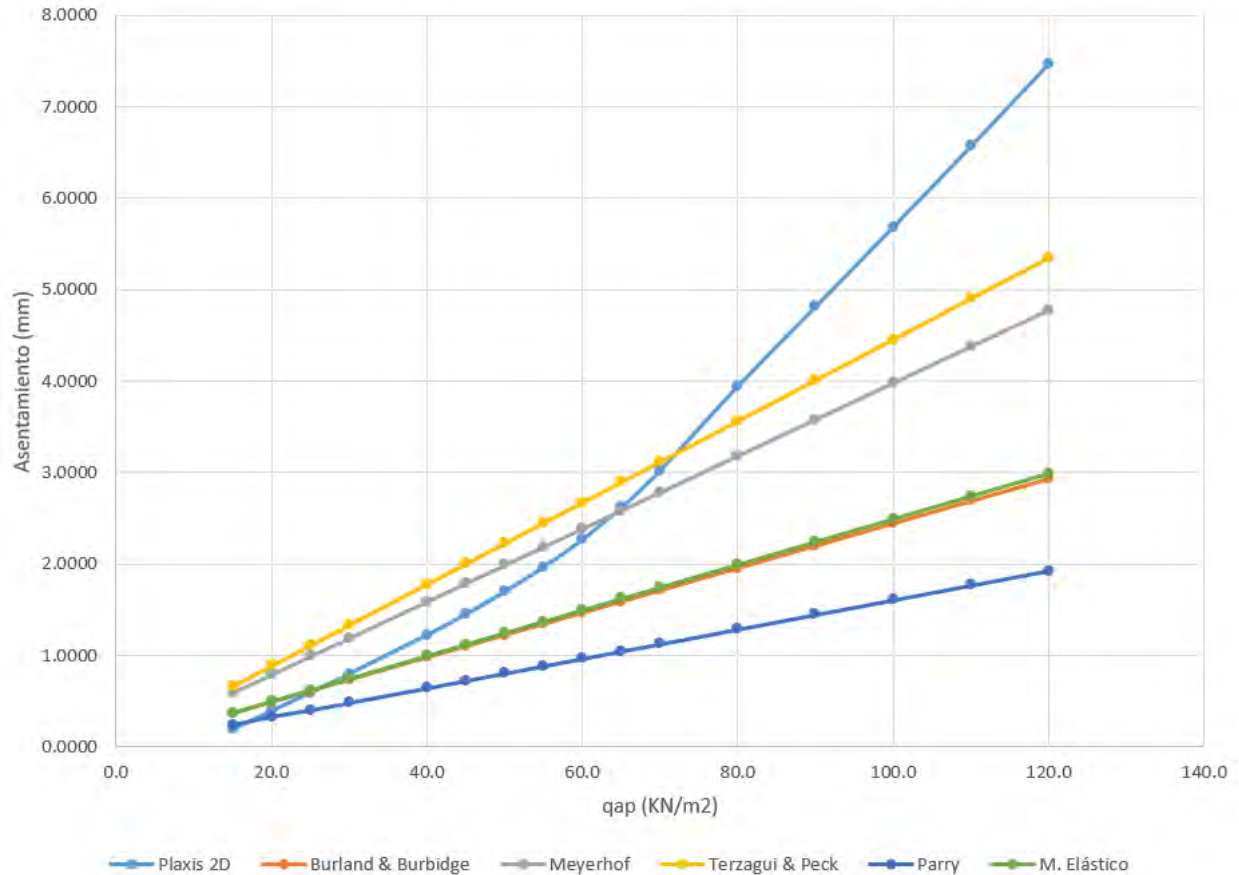


Figura 3.9: Relación q_{ap} vs asentamientos para cargas menores a 1 kg/cm^2 (100 KN/m^2)

De la figura anterior se puede apreciar que para cargas aplicadas menores a 1 kg/cm^2 , se mantiene la relación lineal entre la carga y el valor del asentamiento obtenido mediante los métodos analíticos. En cambio, para el caso de los valores de asentamiento obtenidos mediante el Plaxis 2D, se observa un cambio de pendiente en la gráfica a partir de una carga aplicada de 55 KN/m^2 (0.56 kg/cm^2); es decir, no se mantiene la linealidad que se observaba en la Figura 3.8.

Además, se aprecia que para cargas aplicadas menores a 55 KN/m^2 (0.56 kg/cm^2) los valores de asentamiento obtenidos mediante el Plaxis 2D y los métodos analíticos no difieren en gran medida. A partir de dicho valor de carga, los valores de asentamiento obtenidos del Plaxis 2D aumentan a una tasa mayor que los valores obtenidos de los métodos analíticos. Este hecho puede deberse a la adopción del modelo constitutivo Mohr - Coulomb para realizar los cálculos de asentamiento en el Plaxis. Pues, debido a que el modelo Mohr - Coulomb es un modelo no lineal (modelo elastoplástico perfecto) se puede deducir que a partir de la carga aplicada de 55 KN/m^2 , el suelo deja de comportarse elásticamente y empieza a incursionar en la zona de fluencia del modelo Mohr

– Coulomb, donde existe una degradación progresiva del módulo de rigidez del suelo. Es por ello que, a partir de ese punto el suelo se deforma a una tasa mayor a causa de la degradación de su rigidez.



CAPÍTULO 4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos se concluye que los métodos que usan los mismos parámetros para calcular el asentamiento sobre un suelo granular, presentan valores cercanos de asentamientos. Por ejemplo, los resultados obtenidos al aplicar los métodos Elástico y Burland & Burbidge son similares, debido a que ambos métodos usan los parámetros del suelo como único factor.

Desde el punto de vista metodológico, se puede concluir la importancia de usar métodos computacionales para determinar asentamientos. En el estudio se utilizó el programa Plaxis para obtener los asentamientos para distintas cargas y así comparar con los métodos analíticos. Sin embargo, para obtener un mejor resultado es importante corroborar los parámetros con lo obtenido en el laboratorio.

El método de Burland & Burbidge y el método Elástico toman en cuenta la longitud y la base de la zapata. Por otro lado, para los métodos de Terzaghi & Peck y Meyerhof solo se consideran el ancho de la zapata. Estas consideraciones generan una diferencia entre resultados. Cabe recalcar que los parámetros utilizados son tomados en base a los resultados del estudio de penetración estándar (SPT). Los métodos que se parecen más entre sí generan resultados parecidos. Sin embargo, en esta investigación la forma de la zapata es cuadrada la cual genera una omisión de esta condición, es posible si al modificar la forma de la zapata los resultados sean similares entre sí sin importar el método que se esté usando dado que todos son métodos analíticos y según Terzaghi et. al (1996) los resultados obtenidos en campo son similares a los datos obtenidos según los métodos analíticos.

Por último, se concluye que los métodos analíticos no contemplan algún factor que involucre la degradación progresiva de la rigidez del suelo al aumentar progresivamente la carga (fenómeno

que ocurre en la realidad), pues se observó en las gráficas de carga aplicada (q_{ap}) vs asentamiento que siempre se mantiene una relación lineal entre estos parámetros.

4.2. Recomendaciones

Para el cálculo de asentamientos en suelos granulares se recomienda emplear el método propuesto en el libro de Terzaghi, Peck y Mesri (1996), ya que según la bibliografía recopilada este método modela mejor el comportamiento real del suelo. Es así que en ese libro se muestra que la relación entre los resultados del cálculo versus lo medido en obras es una línea de pendiente 1 (ángulo de 45° con la horizontal), lo cual indica la validez del método tal como se puede visualizar en la Figura 4.1.

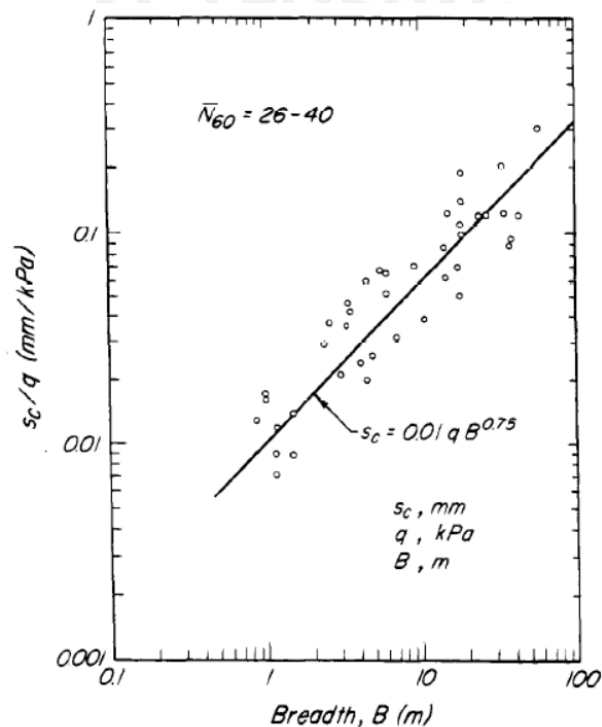


Figura 4.1: Relación entre el asentamiento al final de la construcción de zapatas sobre arena y el ancho de la zapata, para arenas con resistencias de penetración estándar N_{60} entre 26 y 60 (después de Burland y Burdidge 1985)

Por otro lado, se recomienda realizar un análisis en zapatas rectangulares, para así determinar la variación de los resultados del método elástico y Burland & Burbidge respecto al resto de métodos analíticos, ya que estos métodos dependen en gran medida de la relación entre las dimensiones de la zapata.

Asimismo, se sugiere comparar los métodos teniendo en consideración otra fórmula empírica para determinar el módulo de elasticidad. El empleo de una fórmula u otra podría influenciar de manera significativa en los asentamientos producidos por las cargas más bajas, y así en la diferencia de resultados entre métodos.

En esta investigación se obtuvo los parámetros de entrada al programa Plaxis 2D mediante correlaciones con el ensayo SPT (procedimiento poco recomendable), ya que fue el único ensayo con el que contábamos para obtener parámetros resistentes. Lo recomendable realizar ensayos triaxiales o de corte directo para obtener los parámetros de entrada que solicita dicho programa, pues la pobre definición de estos parámetros conduce a resultados poco confiables y que pueden llevarnos a cometer errores groseros.

Por último, con la finalidad de obtener resultados más precisos del cálculo de asentamiento mediante los métodos analíticos presentados en esta investigación, se sugiere dividir los estratos que abarca la profundidad de influencia en subestratos, y aplicar el método de cálculo en cada subestrato, para posteriormente sumar los resultados en de cada subestrato y de esa forma obtener el asentamiento total.

REFERENCIAS

- Akpila, S. (2014). Bearing capacity and settlement response of raft foundation on sand using Standard Penetration Test Method. *SENRA Academic Publishers, British Columbia. Canadian Journal of Pure & Applied Sciences*, 8, 2769-2774.
- Bowles, J.E. (1987) “Elastic Foundation Settlement on Sand Deposits”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 113, núm. 8, pp 846-860.
- Brinkgreve, R. & Broere, Wout & Waterman, Dennis. (2004). Plaxis 2D - Version 8.
- Burland, J.B. y Burbidge, M.C. (1985). “Settlement of Foundations on Sand and Gravel”, *Proceedings, Institute of Civil Engineers*, parte I, vol.7, pp. 1325-1381
- Cier, R. (2015). Procedimiento de Interpolación en el cálculo de asentamientos sobre suelos granulares usando el método de Schmertmann. (Licenciatura). Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Cier, R. (2016). El modelamiento numérico en la resolución de problemas geotécnicos. *CIVILIZATE-PUCP*, 8(1), pp.57-60.
- Chul Shin, E. y Das, B. (2011). Developments in Elastic Settlement Estimation Procedures for Shallow Foundations on Granular Soil. *KSCE J Civ Eng*, 15 (1), 77-89. doi: 10.1007/s12205-011-1028-9
- Das B. y Sivakugan N. (2007). Settlements of shallow foundations on granular soil — an overview. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1 (1), 19-29. doi: 10.3328/IJGE.2007.01.01.19-29
- Das, B. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones* (7ma Edición). Mexico D.F.: Cengage Learning Editores
- Das, B. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (4ta Edición). Mexico D.F.: Cengage Learning Editores
- French, S. (1930). *Design of shallow foundations*. Virginia: ASCE Press

- González O., Herrera M., Iglesias C., y López E. (2013). Análisis de los modelos constitutivos empleados para simular la compactación del suelo mediante el método de elementos finitos. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(3), 75-80. Recuperado en 12 de julio de 2020, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542013000300013&lng=es&tlng=es.
- Jover, R. y Cano, M. (s.f.) *Tema 20 - Cimentaciones superficiales* [Diapositiva de PowerPoint]. Departamento de Ingeniería de la Construcción. Obras Públicas e Infraestructura Urbana de la Universidad de Alicante.
- Kawakami F., Ogawa S. (1966) Yield Stress and Modulus of Elasticity of Soil. En: Kravtchenko J., Sirieys PM (eds) *Rheology and Soil Mechanics / Rhéologie et Mécanique des Sols*. Springer, Berlín, Heidelberg
- Lee, Juahwan y Salgado, R. (2002). Estimation of Footing Settlement in Sand. *The International Journal of Geomechanics*, 2 (1), pág. 1 - 28. doi: 10.1061/(ASCE)1532-3641(2002)2:1(1)
- Lutenegger A. y DeGroot D. (1995). *Settlement of shallow foundations on granular soils*. Massachusetts Highway Department Transportation.
- Marquez, D. y Quintero, H. (2014). Desarrollo de un Software para el cálculo de la capacidad de carga y asentamientos en suelos cohesivos y granulares. (Licenciatura). Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). Norma Técnica E 0.050 Suelos y Cimentaciones. Reglamento Nacional de Edificaciones. Resolución Ministerial.
- Napoles Elsa y González-Carbonell, Raide y Olivares Diaz, Edenio. (2015). Una introducción al Análisis por Elementos Finitos: aplicaciones y ejemplos.
- Navarro, C. y Pérez, J. (2009). *Mecánica De Medios Continuos Y Teoría De Estructuras*. 1st ed. Universidad Carlos III de Madrid: Ingeniería Industrial, Cap. 9.
- Nieto Leal, A., Camacho Tauta, J. and Ruiz Blanco, E., 2009. Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos Mohr-Coulomb y Hardening Soil en suelos arcillosos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), pp.75-91.

Picón, A. y Ruiz, L. (2019). Análisis del problema de interacción suelo-estructura para un pórtico 2D en suelos granulares. (Licenciatura). Pontificia Universidad Católica del Perú.

Sfriso A. (s.f.) *El modelo Hardening Soil* [Diapositiva de PowerPoint]. Buenos Aires, Argentina: SRK Consulting.

Team Brief (2009). *PLAXIS*. [Diapositiva de PowerPoint]

Terzaghi K., Peck R. y Mesri G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3ra. Edición). New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons

