

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE ASENTAMIENTO EN
SUELOS GRANULARES**

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

AUTORES:

Dolores Flores, Eder Meliton
Angeles Ortega, Renzo Freddy
Flores Valencia, Rodrigo Manuel
Muñoz Vargas, Brando Alonso
Parian Rivera, Yordan Marckley

ASESOR:

Zamora Beyk, Juan Pablo

Lima, Julio, 2020

RESUMEN

El diseño de la cimentación en suelos granulares, se realiza normalmente por asentamiento, debido a que el proceso de consolidación del suelo ocurre de manera muy rápida y, por lo tanto, los asentamientos se producen casi al mismo instante en el que se termina la construcción de una estructura. Asimismo, si bien, la normativa vigente en nuestro país (Norma E.050) establece valores de distorsión angular a partir de los cuales se calcula el asentamiento diferencial y total para las obras de construcción, dependiendo del tipo de obra y de la presencia de grietas, no especifica un método para diseñar las zapatas que cumplan con este asentamiento diferencial. Razón por lo cual, queda a criterio del ingeniero responsable elegir el método por el cual se diseñarán estas zapatas en suelos granulares. Entre ellos, encontramos una gran variedad de modelos para estimar asentamientos en suelos granulares, los cuales han sido desarrollados a partir de pruebas en los suelos, como la prueba de penetración estándar, cono de penetración, carga de placa, dilatómetro, etc.

Por lo tanto, la presente investigación tiene como objetivo evaluar los resultados obtenidos al aplicar cinco métodos para el cálculo de asentamiento en suelos granulares. Para ello, se seleccionó cinco métodos que requieren resultados de pruebas de penetración estándar: Terzaghi, Peck & Mesri (1996), Meyerhof (1965), Parry (1971), Burland & Burbidge (1985), D'Apollonia & Asociados (1970), debido a que se cuenta con dichos resultados. Luego se definió los parámetros y valores requeridos para cada método, los cuales se obtuvieron del Estudio de Mecánica de Suelos de un proyecto elaborado con anterioridad. Con dicha información se pudo calcular los asentamientos por cada método en una de las zapatas del proyecto y se realizó la comparación entre ellos. Esta comparación se realizó asumiendo que el valor obtenido por el método de Terzaghi, Peck & Mesri (1996) es el más preciso, debido a que el diseño de la zapata evaluada se realizó aplicando este modelo.

Finalmente, se puede concluir que el modelo de Meyerhof presentó la menor variación respecto al valor asumido (5%); mientras que el modelo de Parry presentó la mayor variación (69%). Respecto al modelo de Burland & Burbidge y D'Apollonia & Asociados presentaron una variación igual al 40% y 26%, respectivamente. Sin embargo, si el modelo de Burland & Burbidge hubiera considerado el factor 1.6 que recomendó tras su investigación, se obtendría como resultado una variación cercana a cero.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| RESUMEN | 2 |
| ÍNDICE | 3 |
| LISTA DE FIGURAS | 4 |
| LISTA DE TABLAS | 5 |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN | 6 |
| 1.1. Antecedentes | 6 |
| 1.2. Justificación | 7 |
| 1.3. Objetivos | 8 |
| 1.3.1. Objetivo General | 8 |
| 1.3.2. Objetivos Específicos | 8 |
| 1.4. Alcances | 8 |
| CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO | 10 |
| 2.1. Meyerhof (1965) | 11 |
| 2.2. D'Appolonia (1970) | 11 |
| 2.3. Parry (1971) | 13 |
| 2.4. Burland y Burbidge (1985) | 15 |
| 2.5. Terzaghi, Peck & Mesri (1996) | 17 |
| CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN | 20 |
| 3.1. Procedimiento | 20 |
| 3.1.1. Área de estudio | 20 |
| 3.1.2. Técnica de recolección de información | 21 |
| 3.1.3. Aplicación de la metodología | 22 |
| 3.1.4. Comparación de resultados | 26 |
| 3.2. Resultados | 26 |
| 3.3. Discusión | 27 |
| CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES | 31 |
| BIBLIOGRAFÍA | 34 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----------|
| <i>Figura 1. Factores de corrección para empotramiento y espesor de capa</i> | <i>12</i> |
| <i>Figura 2. Módulo de Compresibilidad.....</i> | <i>13</i> |
| <i>Figura 3. Relación entre el factor C_D y D/B.....</i> | <i>14</i> |
| <i>Figura 4. Relación entre el factor C_T y T/B.....</i> | <i>15</i> |
| <i>Figura 5. Relación entre m_v y N_{60} obtenida por Burland & Burbidge (1985).....</i> | <i>18</i> |
| <i>Figura 6. Relación entre la zona de influencia y el ancho de la zapata obtenida por Burland & Burbidge (1985).....</i> | <i>18</i> |
| <i>Figura 7. Relación entre el asentamiento de una zapata individual y el promedio de esta obtenida por Burland & Burbidge (1985).....</i> | <i>19</i> |
| <i>Figura 8. Zapata seleccionada del sistema de cimentación</i> | <i>20</i> |



LISTA DE TABLAS

| | |
|---|-----------|
| <i>Tabla 1. Distorsión angular establecida para edificios.....</i> | <i>7</i> |
| <i>Tabla 2. Característica de la zapata evaluada</i> | <i>21</i> |
| <i>Tabla 3. Parámetros de los estratos de suelo</i> | <i>21</i> |
| <i>Tabla 4. Valores de N60 Y N60(a).....</i> | <i>22</i> |
| <i>Tabla 5. Cargas sobre la zapata evaluada.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Tabla 6. Combinaciones de carga sobre la zapata evaluada</i> | <i>22</i> |
| <i>Tabla 7.....</i> | <i>23</i> |
| <i>Tabla 8. Datos de entrada necesarios para aplicar el modelo de Meyerhof (1965)</i> | <i>23</i> |
| <i>Tabla 9. Datos de entrada necesarios para aplicar el modelo de D'Appolonia (1970).....</i> | <i>24</i> |
| <i>Tabla 10. Datos de entrada necesarios para aplicar el modelo de Parry (1971)</i> | <i>24</i> |
| <i>Tabla 11. Datos de entrada necesarios para aplicar el modelo de Parry (1971)</i> | <i>25</i> |
| <i>Tabla 12. Datos de entrada necesarios para aplicar el modelo de Parry (1971)</i> | <i>25</i> |
| <i>Tabla 13. Asentamientos calculados por cada metodología estudiada.....</i> | <i>26</i> |
| <i>Tabla 14. Comparación de resultados</i> | <i>27</i> |
| <i>Tabla 15. Asentamiento y variación porcentual obtenida por el método de Burland & Burbidge (1985) aplicando un factor de 1.6.</i> | <i>29</i> |

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En las obras de construcción civil, los suelos en los cuales se apoyan estas experimentan grandes presiones como consecuencia de las cargas transmitidas a través de las cimentaciones de la obra. Estas presiones adicionales generan un proceso denominado consolidación, en el que toda el agua existente en el suelo se disipa mediante un flujo hacia el exterior; este proceso tiene como consecuencia una reducción del volumen de suelo lo cual se traduce en un asentamiento tanto del suelo como de la estructura y, además, en un aumento de la resistencia al corte del suelo. Para suelos granulares, los cuales cuentan con alta permeabilidad y permiten a los fluidos atravesar estos suelos con facilidad, el proceso de consolidación ocurre de manera muy rápida y, por lo tanto, los asentamientos se producen casi al mismo instante en el que se termina la obra. (Berry & Reid, 1993)

El proceso de asentamiento en los suelos puede significar un gran reto para los ingenieros encargados de las obras de construcción. En muchos casos, el asentamiento no es el mismo en toda la obra y algunas zonas de la obra descienden más que otras; esto se conoce como asentamiento diferencial. Estos asentamientos generan grandes esfuerzos por corte en la obra y los cuales afectan seriamente a algunos elementos estructurales que no cuentan con gran resistencia a este tipo de esfuerzo; además, se tienen problemas para las instalaciones, tanto eléctricas como sanitarias, y problemas estéticos debido a la generación de grietas en diferentes partes de la obra.

Durante muchos años, diversos autores han investigado y propuesto sus propios métodos para poder estimar el asentamiento que se obtendrá en una zapata apoyada sobre suelo granular. Se tiene así los métodos de Terzaghi, Peck & Mesri (1996), Meyerhof (1965), Parry (1971), Burland & Burbidge (1985), D'Apollonia & Asociados (1970), entre otros. Cada método cuenta con su propia fórmula y se basa en diferentes aspectos como las dimensiones de la zapata, número de golpes obtenido del ensayo de penetración estándar (SPT), módulo de elasticidad del suelo, entre otros.

Por lo general, en toda obra de construcción, el asentamiento diferencial se asume como un valor máximo establecido por la norma de construcción de cada país y, con las fórmulas propuestas por cada autor, se obtienen las dimensiones de las diferentes zapatas que conformarán la cimentación de la obra. En el Perú, la norma E.050 Suelos y Cimentaciones

establece este valor máximo de asentamiento diferencial mediante una distorsión angular; esta es la relación entre el asentamiento diferencial entre dos zapatas (δ) y la distancia horizontal de esta (L). Los valores propuestos por la norma se pueden observar en la tabla 1.

Tabla 1. Distorsión angular establecida para edificios

| DISTORSIÓN ANGULAR (α) | |
|---------------------------------|--|
| $\alpha = \delta/L$ | Descripción |
| 1/150 | Límite en el que se debe esperar daño estructural en edificios convencionales. |
| 1/250 | Límite en que la pérdida de verticalidad de edificios altos y rígidos puede ser visible. |
| 1/300 | Límite en que se debe esperar dificultades con puentes grúas. |
| 1/300 | Límite en que se debe esperar las primeras grietas en paredes. |
| 1/500 | Límite seguro para edificios en los que no se permiten grietas. |
| 1/500 | Límite para cimentaciones rígidas circulares o para anillos de cimentación de estructuras rígidas, altas y esbeltas. |
| 1/650 | Límite para edificios rígidos de concreto cimentado sobre un solado con espesor aproximado de 1,20 m. |
| 1/750 | Límite donde se esperan dificultades en maquinaria sensible a asentamientos. |

Fuente: Adaptada de la Norma E.050.

En el Perú, especialmente en Lima, el sector de construcción civil ha crecido de manera significativa en los últimos años. En Lima, se tiene gran presencia de suelos granulares como resultado de los depósitos sedimentarios dejados por el río Rímac a través de los años. Como se mencionó, los asentamientos en suelos granulares ocurren de manera casi inmediata una vez terminada la obra de construcción, por lo que es necesario diseñar zapatas que permitan que el asentamiento diferencial no sea tan alto y se cumpla con lo establecido por la norma.

1.2. Justificación

Si bien la norma E.050 Suelos y Cimentaciones establece valores de distorsión angular a partir de los cuales se calcula el asentamiento diferencial y total para las obras de construcción en el Perú, dependiendo del tipo de obra y si se busca o no presencia de grietas, no indica un método específico para diseñar las zapatas que cumplan con este asentamiento diferencial. Por lo tanto, es necesario comparar varios métodos propuestos por diferentes autores, para así poder discutir los aspectos y valores que considera cada fórmula y determinar qué método es el más preciso para diseñar las zapatas de las obras de construcción.

Diseñar las zapatas de una obra para suelo granular con un método que no considere aspectos y variables importantes para estimar los asentamientos puede generar problemas una vez terminada la obra; esto debido a que los asentamientos calculados no serán los reales y puede darse, en algunos casos, problemas estructurales en la obra que a futuro generen mayores costos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar los resultados obtenidos al aplicar cinco métodos para el cálculo de asentamiento en suelos granulares.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Establecer cinco métodos diferentes para el cálculo de asentamiento en suelos granulares.
- Definir los parámetros y variables requeridos para cada método.
- Calcular el asentamiento para una zapata con cada método establecido
- Comparar la variabilidad de los resultados
- Discutir los resultados obtenidos

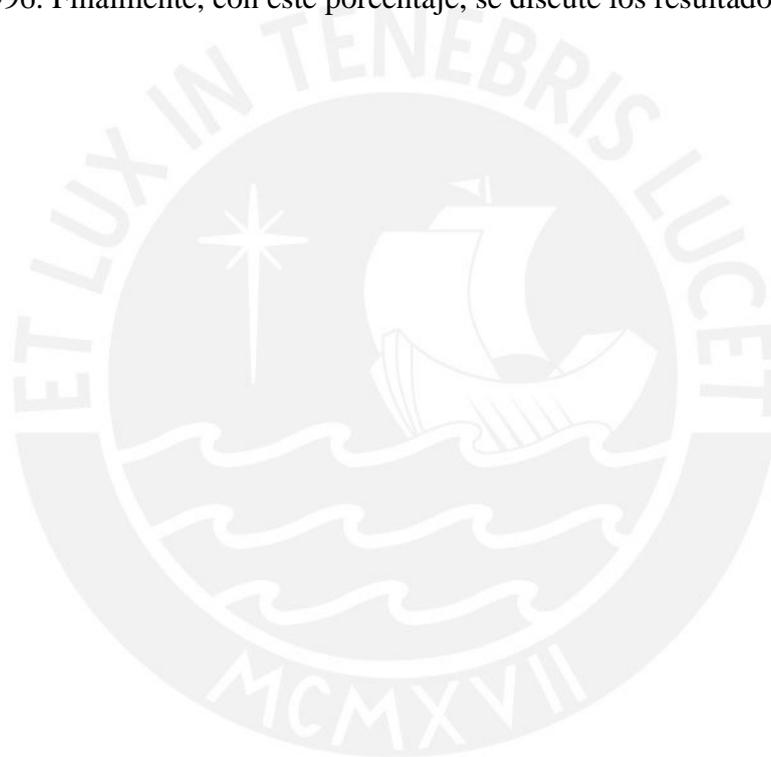
1.4. Alcances

El presente trabajo evalúa el asentamiento en suelos granulares para un pabellón de dos pisos de salas de cómputo que se encuentra en las intersecciones de las avenidas Raúl Ferrero y Los Fresnos, La Molina, Lima, Perú. Las zapatas de esta edificación fueron diseñadas mediante el método de Terzaghi, Peck & Mesri (1996) y se tomaron valores de suelo típicos para la zona; además, las cargas aplicadas a la zapata fueron obtenidas mediante un análisis estructural de todo el pabellón de cómputo. Por lo tanto, se tomará al asentamiento calculado mediante este método como el real.

Si bien se discutirá si algún método es más preciso que otro mediante su aproximación a un resultado real, esto solo aplica para el proyecto bajo estudio. Para otras obras, al realizar el mismo estudio, es probable que se obtengan resultados diferentes y un método que no se asemeje a la realidad en la obra a estudiar si lo haga en otra. Se necesitan de más estudios en varias obras del Perú sobre suelos granulares para así poder determinar que métodos se asemejan más a la realidad y establecer ciertas condiciones de suelo y obra para así elegir el método más efectivo para el diseño de zapatas.

1.5. Metodología

El proceso a seguir consiste primero en determinar el área y objeto de estudio; esta investigación seleccionará el proyecto mencionado anteriormente y una zapata perteneciente a este. Se procederá luego a obtener las dimensiones de la zapata y las propiedades mecánicas del suelo, incluido el número de golpes obtenidos mediante el ensayo de penetración estándar (SPT). Luego, se obtendrán los datos requeridos por cada método propuesto en el marco teórico con el fin de poder usarlos las fórmulas propuestas para calcular el asentamiento. Una vez obtenidos los asentamientos para cada método, se procederá a realizar una comparación mediante la obtención del porcentaje de variación respecto al método de Terzaghi, Peck & Mesri del año 1996. Finalmente, con este porcentaje, se discute los resultados obtenidos.



CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

Terzaghi & Peck (1948) plantearon un método para hallar asentamientos en zapatas apoyadas sobre suelo granular propuesto, el cual es considerado como el primer método racional para lograr ello. La ecuación (1) muestra este modelo.

$$s = \frac{3 \cdot q}{N} \cdot \left(\frac{2 \cdot B}{B + 1} \right)^2 \quad (1)$$

Dónde:

s: Asentamiento (pulgadas)

q: Presión admisible (ton/pie²)

B: Ancho de la zapata (pie)

N: Número de golpes promedio del ensayo SPT.

El valor de N será el promedio de los golpes más desfavorables registrados entre el fondo de la zapata y una distancia mínima igual a B, debajo de la zapata. El presente modelo propone corregir este valor si el suelo está compuesto por arenas finas y arenas limosas bajo el nivel freático, se corregirá utilizando la ecuación (2).

$$N_{60} = 15 + 0.5 \cdot (N - 15) \quad (2)$$

Asimismo, este modelo contempla correcciones por nivel freático (C_w) y empotramiento (C_d) como se muestra en las ecuaciones (3) y (4).

$$C_w = 2 - 0.5 \cdot \frac{D_w - D_f}{B} \quad (3)$$

$$C_d = 1 - 0.25 \cdot \frac{D_f}{B} \quad (4)$$

Dónde:

D_w : Profundidad del nivel freático (pie)

D_f : Profundidad de cimentación (pie)

A partir de este primer modelo, se han formulado múltiples métodos; por lo que a continuación se detallarán cinco de ellos en orden cronológico y relacionándolos entre sí.

2.1. Meyerhof (1965)

Meyerhof (1965) propone aumentar en 50% la presión admisible propuesta por Terzaghi y Peck, a partir de la comparación de asentamientos medidos y calculados mediante este método. Das (1983) planteó las ecuaciones (5), (6) y (7), según el tipo de zapata, de acuerdo a lo propuesto por Meyerhof.

$$s = \frac{0.13.p}{N}, \text{ para } B \leq 1.2 \text{ m} \quad (5)$$

$$s = \frac{0.19.p}{N} \cdot \left(\frac{B}{B+0.3}\right)^2, \text{ para } B > 1.2 \text{ m} \quad (6)$$

$$s = \frac{0.19.p}{N}, \text{ para placas} \quad (7)$$

Dónde:

s: Asentamiento (cm)

p: Presión media sobre la base de la cimentación (KN/m²)

B: Ancho de la zapata (m)

Brown & Meyerhof (1969) utilizan el factor de corrección por empotramiento planteado por Terzaghi & Peck (1948); sin embargo, menciona que no debe corregirse por nivel freático, toda vez que la influencia de este se refleja en el ensayo SPT.

2.2. D'Appolonia (1970)

D'Appolonia (1970) plantea calcular el asentamiento de un suelo granular suponiendo que la arena es un sólido elástico, homogéneo e isótropo. Para poder llevar a cabo esta metodología, se planteó la ecuación (8) para el cálculo de asentamiento:

$$\delta = \frac{q \cdot B}{E} \cdot (1 - \nu^2) \cdot I \quad (8)$$

Dónde:

δ : Asentamiento (cm)

q: Presión media sobre la base de la cimentación (KN/m²)

E: Módulo de elasticidad del estrato de apoyo

ν : Módulo de Poisson del estrato de apoyo

El factor I (Factor de Influencia) resulta del producto de dos factores, (μ_0) (μ_1), los cuales dependen de la geometría y profundidad de la zapata y la profundidad de una capa incompresible. Estos factores fueron desarrollados por Janbu et al. (1956) y modificados

posteriormente por Christian & Carrier (1978). A continuación, se muestra los gráficos para obtener estos factores:

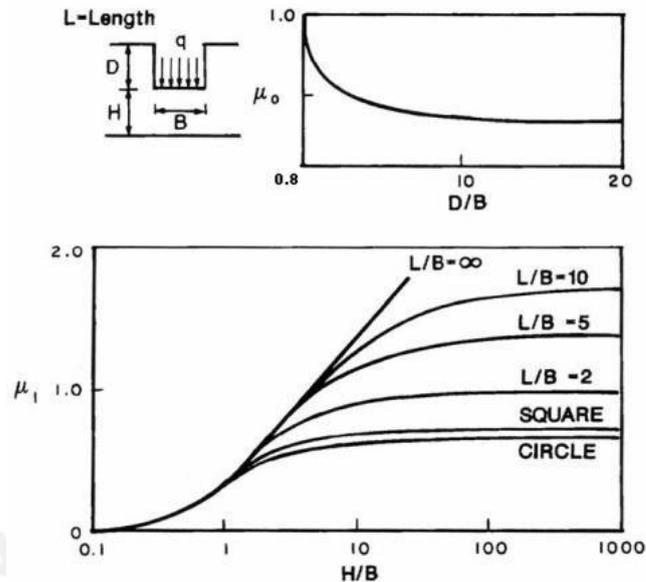


Figura 1. Factores de corrección para empotramiento y espesor de capa
Fuente: Christian & Carrier, 1978.

La importancia del método radica en la determinación del módulo de Young del suelo. Este valor está en función del valor del número de golpes N (SPT). Este valor es obtenido como el promedio no corregido entre la base de la zapata y una profundidad B (Base de la zapata), debajo de la zapata. A su vez no se aplica ningún factor de corrección. De esta forma se obtienen las ecuaciones (9) y (10) en unidades S.I:

Para arena normalmente cargada

$$\frac{E}{(1 - \nu^2)} \left(\frac{kg}{cm^2} \right) = 209 + 8.9N \quad (9)$$

Para arena precargada

$$\frac{E}{(1 - \nu^2)} \left(\frac{kg}{cm^2} \right) = 473 + 11.9N \quad (10)$$

A continuación, se muestra las correlaciones originales propuestas por D'Appolonia et al. (1968, 1970).

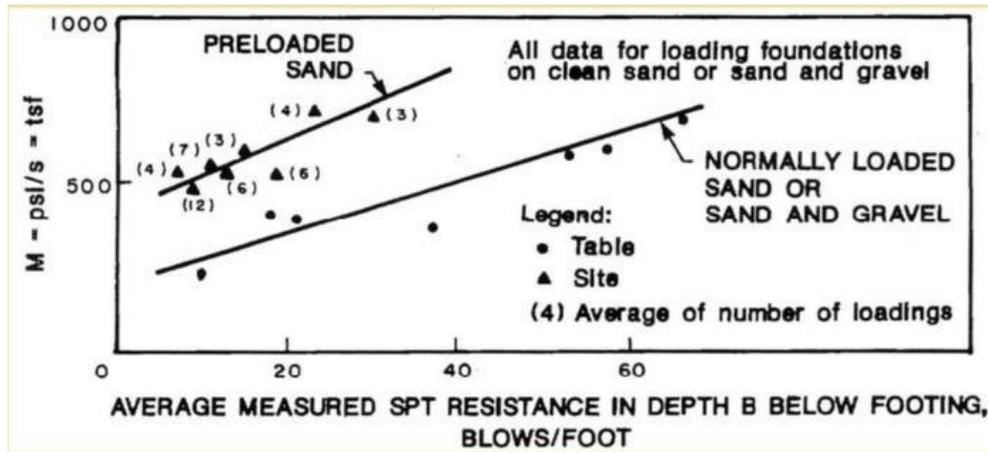


Figura 2. Módulo de Compresibilidad
Fuente: D'Appolonia, 1968, 1970.

2.3. Parry (1971)

Este método relaciona el asentamiento en suelos granulares con el número de golpes obtenidos del ensayo de penetración estándar (SPT). Este método surge con una ecuación inicial propuesta por el mismo autor que relaciona el asentamiento con el ancho de la cimentación, la carga aplicada y el módulo de deformación del suelo. Se asumen además que existe una relación directa entre este módulo de deformación y el número de golpes del ensayo SPT, ya que ambos dependen de la relación de vacíos y la presión de confinamiento en suelos granulares. Así se tiene la ecuación (11).

$$\rho = \alpha * \frac{qB}{N_m} \quad (11)$$

Dónde:

p = asentamiento en la zapata (mm)

α = constante, igual a 200

q = carga aplicada (MN/m^2)

B = ancho de la zapata (m)

N_m = número de golpes obtenido del ensayo SPT

Esta ecuación se corrige con tres factores, los cuales se detallan a continuación:

Factor de corrección por excavación (C_D)

Parry considera que la excavación realizada para construir las zapatas configura el sistema presiones en el suelo, modificando así los valores de N . Propone entonces un factor para corregir este valor mediante la siguiente tabla que relaciona el factor C_D con la relación de la profundidad de cimentación D y el ancho de la zapata B .

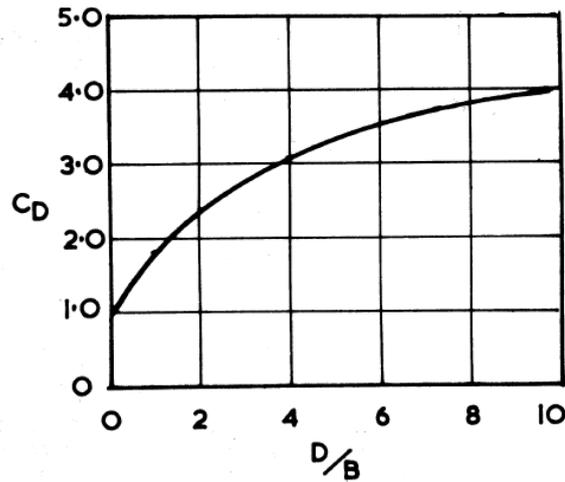


Figura 3. Relación entre el factor C_D y D/B .
Fuente: Parry, 1971.

Factor de corrección por nivel de napa freática (C_W)

Se considera para este factor la influencia de la napa freática en el suelo hasta una profundidad de $2B$ debajo del nivel de cimentación. Las ecuaciones (12) y (13) detallan el cálculo de este factor.

$$C_W = 1 + \frac{D_W}{D + 3B/4}, \text{ para } 0 < D_W < D \quad (12)$$

$$C_W = 1 + \frac{D_W(2B + D - D_W)}{2B(D + 0.75B)}, \text{ para } D < D_W < 2B \quad (13)$$

Donde:

D_W = profundidad de nivel de napa freática

D = profundidad de cimentación

B = ancho de la zapata

Factor de corrección por espesor de la capa comprimida (C_T)

Este factor se obtiene asumiendo que la primera mitad del asentamiento ocurre a una profundidad $3B/4$ mientras que el resto se da entre las profundidades $3B/4$ y $2B$. Parry propone la siguiente relación entre C_T y T/B donde T es el espesor de la capa debajo de la cimentación y B el ancho de la zapata.

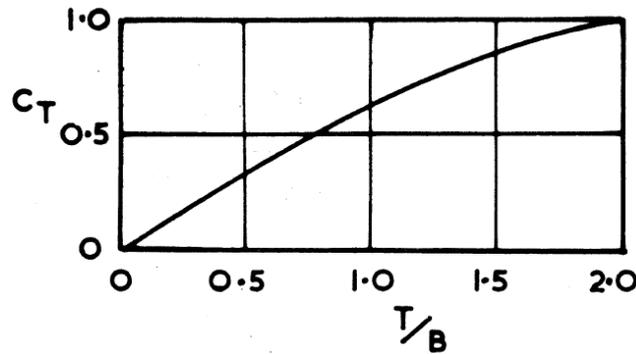


Figura 4. Relación entre el factor C_T y T/B .
Fuente: Parry 1971

Finalmente, se tiene la siguiente expresión para calcular asentamientos en suelos granulares formulada por Parry.

$$\rho = \alpha * \frac{qB}{N_m} * C_D * C_W * C_T \quad (14)$$

2.4. Burland y Burbidge (1985)

El método semi-empírico presentado por Burland y Burbidge (1985) que se basa en un análisis estadístico 200 casos de asentamiento utiliza los resultados del ensayo SPT para estimar el asentamiento en suelos granulares. El presente método toma en cuenta los siguientes factores: intensidad de carga, las dimensiones de la zapata, la profundidad de influencia bajo la zapata y si el elemento se encuentra consolidado normalmente o preconsolidado.

Se utilizan las siguientes expresiones para calcular los asentamientos, de acuerdo con la consolidación del suelo:

$$s = C_s * C_i * I_c * (B)^{0.7} * \left(\frac{q'}{\sigma_r} \right), \quad (15)$$

para suelo normalmente consolidado

$$s = 1/3 * C_s * C_i * I_c * (B)^{0.7} * \left(\frac{q'}{\sigma_r} \right), \quad (16)$$

para suelo preconsolidado y $q' \leq \sigma'_c$

$$s = C_s * C_i * I_c * (B)^{0.7} * \left(\frac{q' - 0.67 * \sigma'_c}{\sigma_r} \right), \quad (17)$$

para suelo preconsolidado y $q' > \sigma'_c$

Donde:

S: asentamiento (m)

Cs: factor de forma

Ci: factor de corrección por capa rígida

Ic: índice de compresibilidad del suelo

B: ancho de la zapata (m)

Br: ancho de referencia, igual a 0.3 m.

q': tensión efectiva bruta en la base de la cimentación (kPa)

σ_r : presión de referencia, igual a 100 kPa.

σ'_c : presión de preconsolidación (kPa)

Factor de forma:

$$C_s = \left(\frac{1.25 * \frac{L}{B}}{\frac{L}{B}} + 0.25 \right)^2 \quad (18)$$

Donde:

L = longitud de la zapata

B = ancho de la zapata

Se debe tener en cuenta que el factor de corrección Cs es 1 para una base cuadrada o circular, y para zapatas corridas o alargadas Cs = 1.56 cuando L/B tiende al infinito.

Factor de corrección por estrato rígido

$$C_i = \frac{H}{Z_i} * \left(2 - \frac{H}{Z_i} \right) \leq 1 \quad (19)$$

Donde:

H = profundidad desde el fondo de la zapata hasta el fondo del suelo comprimido.

Z = factor de influencia bajo la zapata = $(B)^{0.75}$

Si los valores del ensayo SPT, N_{60} , disminuyen con la profundidad, se debe usar $Z_1=2B$ o la profundidad hasta la base de la capa suelta, la que resulte menor. Asimismo, si el valor de H es mayor a Zi, el valor de Ci será igual a 1.

Índice de compresibilidad del suelo

$$I_c = \frac{1.71}{\tilde{N}_{60}^{1.4}} \quad \text{para suelo no consolidado} \quad (20)$$

$$I_c = \frac{0.57}{\tilde{N}_{60}^{1.4}} \quad \text{para suelo preconsolidado} \quad (21)$$

Donde:

\tilde{N}_{60} = Promedio ajustado de los resultados del ensayo SPT

Si el suelo es muy fino y está sumergido o es arena sedimentada con $N_{60} > 15$, el valor de N_{60} será ajustado utilizando los valores propuestos por Terzaghi y Peck (1948). Si el suelo es grava arenosa se recomienda multiplicar el valor de N_{60} por un factor de ajuste de 1.25 (Burland & Burbidge, 1985).

2.5. Terzaghi, Peck & Mesri (1996)

A partir del primer método planteado Terzaghi & Peck (1948), se han realizado diversos estudios con el fin de mejorar este método y hacerlo cada vez más preciso; así, se tienen los métodos de Meyerhof (1965), Peck y Bazaraa (1969), entre otros (Das & Sivakugan, 2007). De la manera particular, con ayuda de gráficos desarrollados por Burland & Burbidge, Gholamreza Mesri obtiene una relación para estimar el asentamiento de zapatas sobre suelos granulares (Picón & Ruiz, 2019). En base a esta relación, Terzaghi, Peck & Mesri (1996) plantean un nuevo modelo, cuyo procedimiento de desarrollo es explicado a continuación.

Primero, Mesri propone la siguiente relación para estimar el asentamiento la cual se presenta en la ecuación (22).

$$S = Z_i m v q \quad (22)$$

Donde:

q: presión sobre el suelo

Z_i : zona de influencia de la zapata

mv: factor de compresibilidad vertical del estrato.

Estos dos últimos factores pueden ser definidos mediante las figuras 3 y 4 obtenidas por Burland & Burbidge en 1985, de las cuales se obtienen las ecuaciones (23) y (24).

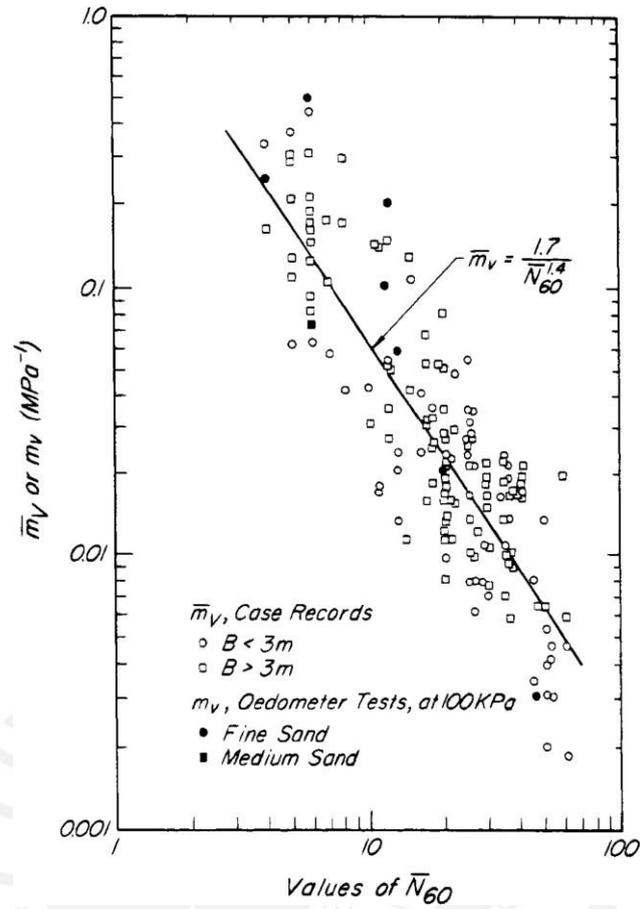


Figura 5. Relación entre m_v y N_{60} obtenida por Burland & Burbidge (1985).
Fuente: Terzaghi, Peck & Mesri (1996)

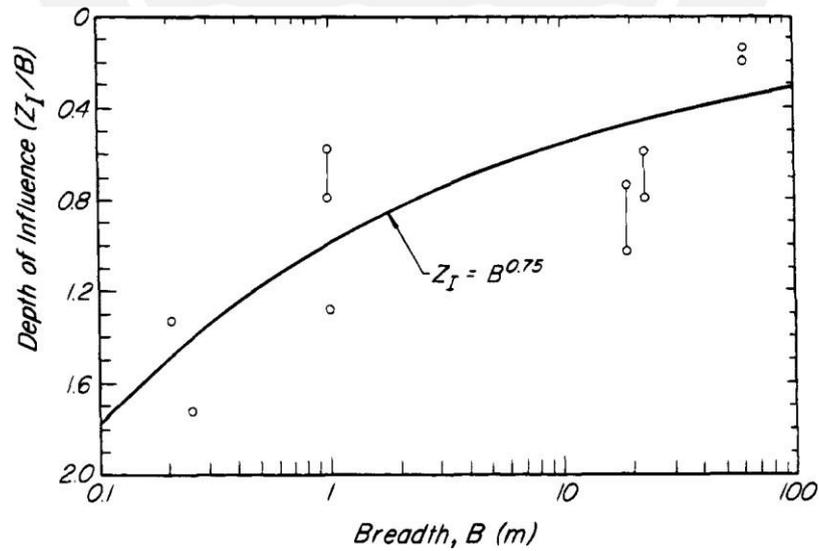


Figura 6. Relación entre la zona de influencia y el ancho de la zapata obtenida por Burland & Burbidge (1985).
Fuente: Terzaghi, Peck & Mesri (1996)

$$mv = \frac{1.7}{N_{60}^{1.4}} \quad (23)$$

$$Zi = B^{0.75} \quad (24)$$

Las expresiones (23) y (24) se reemplazan en la ecuación (22) para obtener la expresión (25):

$$S = B^{0.75} \frac{1.7}{N_{60}^{1.4}} qFf \quad (25)$$

Donde la presión admisible se encuentra en KPa y B en metros.

Además, se agrega un factor de forma Ff si se tiene una zapata rectangular, el cual se obtiene mediante la expresión (26):

$$Ff = \left[\frac{\left(\frac{L'}{B'} \right) + 0.25}{1.25 \left(\frac{L'}{B'} \right)} \right]^2 \quad (26)$$

Finalmente, se utiliza una gráfica obtenida por Burland & Burbidge en 1985 que indica que el asentamiento real es 1.6 veces el obtenido de la fórmula (Figura 7); con esta información y reemplazando las unidades de presión a kg/cm² se obtiene la ecuación (27) para estimar el asentamiento de una zapata sobre suelo granular.

$$S = 26.667q \frac{B^{0.75}}{N_{60}^{1.4} * Ff} \quad (27)$$

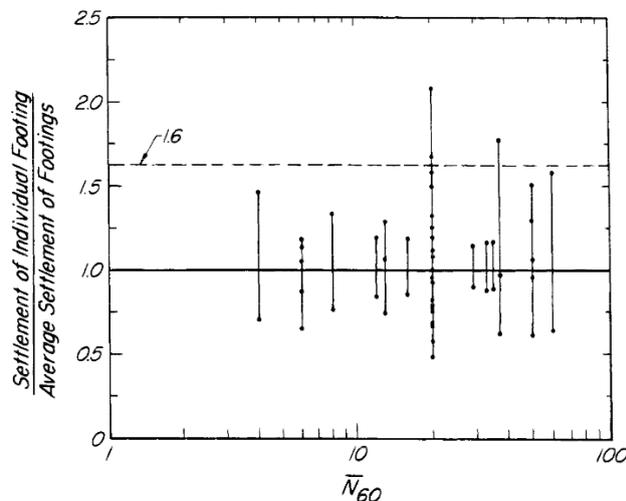


Figura 7. Relación entre el asentamiento de una zapata individual y el promedio de esta obtenida por Burland & Burbidge (1985). Fuente: Terzaghi, Peck & Mesri (1996)

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación tiene objetivo comparar los resultados del cálculo de asentamiento de una zapata en suelo granular por medio de cinco metodologías. Este cálculo se realizó para una zapata cuadrada de proyecto de referido al diseño de un pabellón educativo, el cual se encuentra asentado sobre un estrato de arena mal gradada. Las metodologías utilizadas fueron las propuestas por Terzaghi, Peck & Mesri (1996), Meyerhof (1965), Parry (1971), Burland & Burbidge (1985) y D'Apollonia & Asociados (1970). Los resultados fueron comparados entre sí a fin de evaluar la variabilidad de estos y las posibles razones de esta.

3.1. Procedimiento

3.1.1. Área de estudio

Se seleccionó para el cálculo de asentamiento una zapata cuadrada del proyecto mencionado, el cual se encuentra ubicado en la urbanización El Remanso, en el distrito de La Molina. Este consiste en una edificación de dos pisos de la Universidad Nacional Agraria La Molina con un baño y dos salas de cómputo por piso.

La zapata a evaluar pertenece a un sistema de cimentación superficial comprendido por diez zapatas cuadradas y doce zapatas rectangulares. Este diseño forma parte del Estudio de Mecánica de Suelos (EMS) realizado para el proyecto mencionado por los autores de la presente investigación. Por lo cual, la zapata escogida para evaluar se muestra en la figura 1 y posee las características descritas en la tabla 2.

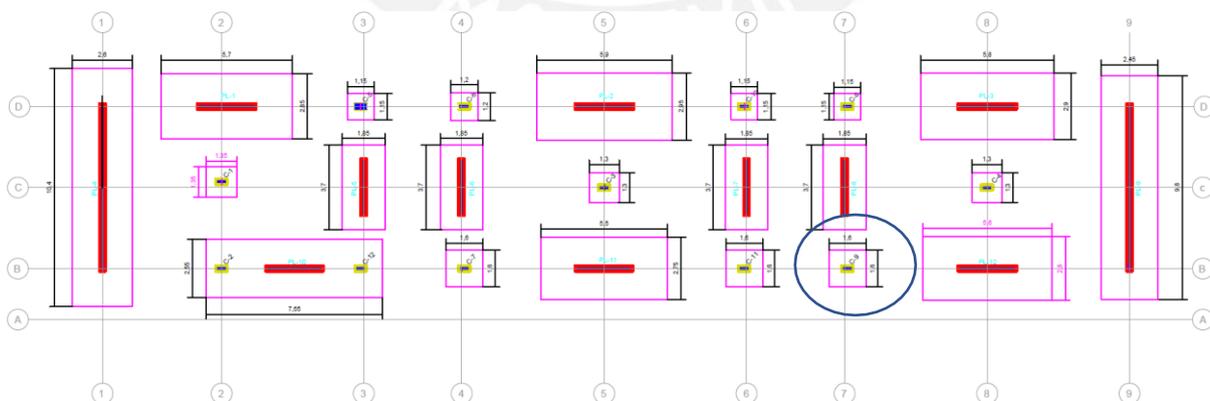


Figura 8. Zapata seleccionada del sistema de cimentación
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Característica de la zapata evaluada

| | |
|---------------------------------|-------|
| Base | 1.6 m |
| Largo | 1.6 m |
| Profundidad de cimentación (Df) | 1.2 m |
| Estrato sobre en que se asienta | SP |

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. Técnica de recolección de información

Los datos necesarios para la aplicación de cada una de las metodologías escogidas han sido recolectados en cumplimiento con la Norma Técnica E.050 “Suelos y Cimentaciones”. Entre estos encontramos el perfil estratigráfico del suelo y sus características; así como los resultados de los ensayos SPT. Por lo cual, en las siguientes líneas se detallará el procedimiento realizado y la información recolectada.

El perfil estratigráfico del suelo y las características de sus estratos se determinaron por medio de una exploración en campo y ensayos de laboratorio a las muestras extraídas. El programa de exploración de campo comprendió tres perforaciones mediante espiral mecánico de cinco metros de profundidad, recolección de cuatro muestras por punto de exploración tipo Mab a un metro de distancia y realización de 4 ensayos de penetración estándar SPT en cada punto de exploración. Además, a cuatro muestras tomadas se realizó una serie de ensayos de laboratorio, lo cual nos permitió determinar las características principales de los estratos. Finalmente, compatibilizando los resultados se obtuvo el perfil de suelo y las características de los estratos como se detalla en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de los estratos de suelo

| Estrato | Prof. inicial (m) | Prof. final (m) | γ (gr/cm ³) | w (%) | Gs | γ_d (gr/cm ³) | ϕ | Dr (%) |
|---------|-------------------|-----------------|--------------------------------|-------|------|----------------------------------|--------|--------|
| SM | 0 | 1.2 | 1.75 | 4 | 2.65 | 1.685 | 36.3 | 87.67 |
| SP | 1.2 | 3 | 1.89 | 5 | 2.65 | 1.8 | 37.2 | 84.44 |
| SP | 3 | 4.5 | 1.90 | 7 | 2.65 | 1.78 | 36.5 | 79.50 |

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, en base a los resultados del ensayo SPT, se determinó el valor de N60. Tras los ajustes por longitud de barra y por porcentaje de grava, se obtuvo los valores de N60(a). La tabla 4 muestra los valores N60 y N60(a) a cada nivel del ensayo, compatibilizado con el perfil de suelo.

Tabla 4. Valores de N60 Y N60(a)

| SPT | | SUCS | N | | | CR | | | Corrección por longitud de barras N60 | | | Corrección %Grava N60(a) | | |
|-----------|----------------|------|----|----|----|-------|-------|-------|---------------------------------------|--------|--------|--------------------------|-------|-------|
| Prof. (m) | Prof. +0.3 (m) | | P1 | P2 | P3 | P1 | P2 | P3 | P1 | P2 | P3 | P1 | P2 | P3 |
| 1 | 1.3 | SM | 25 | 24 | 26 | 0.734 | 0.738 | 0.742 | 18.35 | 17.712 | 19.292 | 18.35 | 17.71 | 19.29 |
| 2 | 2.3 | SP | 29 | 27 | 28 | 0.796 | 0.793 | 0.79 | 23.084 | 21.411 | 22.12 | 23.08 | 21.41 | 22.12 |
| 3 | 3.3 | SP | 27 | 29 | 29 | 0.84 | 0.836 | 0.836 | 22.68 | 24.244 | 24.244 | 28.35 | 30.31 | 30.31 |
| 4 | 4.3 | SP | 31 | 30 | 32 | 0.887 | 0.893 | 0.89 | 27.497 | 26.79 | 28.48 | 34.37 | 33.49 | 35.60 |

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3. Aplicación de la metodología

Las cargas actuantes sobre la zapata cuadrada evaluada se muestran en la tabla 5, en esta podemos observar tanto las cargas por gravedad como las cargas sísmicas, las cuales se obtuvieron mediante metrado de cargas verticales y análisis sísmico.

Tabla 5. Cargas sobre la zapata evaluada

| Columna | Ubicación Ejes | Combinación | P (ton) | VX (ton) | VY (ton) | Mxx (ton.m) | Myy (ton.m) |
|---------|----------------|-------------|---------|-----------|----------|-------------|-------------|
| C9 | B-7 | CM | -45.94 | -0.002225 | 0.001428 | -0.001201 | 0.01 |
| | | CV | -17.99 | 0.04 | 0.00053 | -0.001352 | 0.07 |
| | | Sismo XX | 0.83 | 0.95 | 0.000734 | 0.00242 | 2.46 |
| | | Sismo YY | 3.2 | 0.02 | 0.02 | 0.1 | 0.04 |

Fuente: Elaboración propia.

El cálculo de asentamiento de la zapata seleccionada se realizó para las siguientes combinaciones de carga, las cuales se muestran numéricamente en la tabla 6.

- Combinación CM+CV: Solo se tomó en cuenta las cargas por gravedad
- Combinación CM+CV+SSx/1.25: Se tomó en cuenta todas las cargas
- Combinación CM+CV+SSy/1.25: Se tomó en cuenta todas las cargas

Tabla 6. Combinaciones de carga sobre la zapata evaluada

| COMBINACIÓN | P (ton) | VX (ton) | VY (ton) | Mxx (ton) | Myy (ton) | ex (m) | ey (m) |
|--------------------|---------|----------|----------|-----------|-----------|--------|--------|
| CM+CV | 63.933 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| CM+CV+SismoXX/1.25 | 64.597 | 0.798 | 0.003 | -0.001 | 2.048 | 0.000 | 0.032 |
| CM+CV+SismoYY/1.25 | 66.493 | 0.054 | 0.018 | 0.077 | 0.112 | 0.001 | 0.002 |

Fuente: Elaboración propia.

A partir de estas combinaciones podemos calcular la presión aplicada (Q_{ap}) y las longitudes de la zapata efectiva (B' y L'), como se aprecia en la tabla 7. Cabe señalar que el valor de ancho efectivo y lago efectivo, se refiere a la diferencia entre la distancia bruta menos el doble de la excentricidad en su misma dirección.

Tabla 7.

| COMBINACIÓN | B' (m) | L' (m) | Q_{ap} (ton/m ²) |
|--------------------|----------|----------|--------------------------------|
| CM+CV | 1.600 | 1.600 | 24.97 |
| CM+CV+SismoXX/1.25 | 1.600 | 1.537 | 26.27 |
| CM+CV+SismoYY/1.25 | 1.598 | 1.597 | 26.07 |

Fuente: Elaboración propia.

En base a estos datos y las variables requeridas para cada una de las siguientes metodologías, se calculó el asentamiento de la zapata aplicando cada uno de ellos:

a) Meyerhof (1965)

Dada la forma de la zapata, se utilizó la ecuación (6). Esta ecuación depende de la presión aplicada (Q_{ap}), el ancho efectivo (B'), profundidad de cimentación (D_f igual a 1.2 m) y el número de golpes del ensayo SPT (N_{60}). Este último únicamente se encuentra corregido por longitud de barra, pues Meyerhof no considera corrección por porcentaje de grava, ni nivel freático. Asimismo, el valor N_{60} utilizado es el promedio de los valores entre la profundidad de cimentación y una distancia igual al ancho de la zapata (1.6 m) por debajo de esta. Cabe señalar que el asentamiento se corrige por empotramiento (C_d). Los datos de entrada de esta metodología de muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Datos de entrada necesarios para aplicar el modelo de Meyerhof (1965)

| COMBINACIÓN | Meyerhof | | | | |
|--------------------|----------|-----------|--------------------------------|----------|-------|
| | B' (m) | D_f (m) | Q_{ap} (ton/m ²) | N_{60} | C_d |
| CM+CV | 1.600 | 1.2 | 24.97 | 20.33 | 0.813 |
| CM+CV+SismoXX/1.25 | 1.600 | 1.2 | 26.27 | 20.33 | 0.812 |
| CM+CV+SismoYY/1.25 | 1.598 | 1.2 | 26.07 | 20.33 | 0.812 |

Fuente: Elaboración Propia.

b) D'Apollonia (1970)

Para el cálculo mediante este método se utilizó la ecuación (8). Este modelo requiere como datos de entrada la presión aplicada (Q_{ap}), el espesor del estrato de apoyo (H), ancho de la zapata (B') y el número de golpes del ensayo SPT (N_{60}). Este último es el promedio de los

valores entre la profundidad de la zapata y una distancia B a partir de esta. La tabla 9 muestra los datos de entrada necesarios para este modelo.

Tabla 9. Datos de entrada necesarios para aplicar el modelo de D'Appolonia (1970)

| COMBINACIÓN | D'Appolonia (1970) | | | |
|--------------------|--------------------|---------------------------|-------|---|
| | B' (m) | Qap (ton/m ²) | N60 | E/(1-ν ²) (kg/cm ²) |
| CM+CV | 1.600 | 24.97 | 20.33 | 389.921 |
| CM+CV+SismoXX/1.25 | 1.600 | 26.27 | 20.33 | 389.921 |
| CM+CV+SismoYY/1.25 | 1.598 | 26.07 | 20.33 | 389.921 |

Fuente: Elaboración propia.

c) Parry (1971)

Para el cálculo mediante este método se utilizó la ecuación (11). Este modelo requiere como datos de entrada la presión aplicada (Qap), el ancho efectivo de la zapata (B') y el número de golpes del ensayo SPT (N60). Este último es el promedio de los valores entre la profundidad de la zapata y una distancia igual a $\frac{3}{4}$ del ancho de la zapata ($\frac{3}{4} B'$) por debajo de esta.

Asimismo, este método incluye tres factores de corrección. La primera es por espesor de la capa comprimida (CT) para lo cual se utilizó la figura 4. Este factor depende de la relación entre la profundidad de cimentación (Df) y el ancho de la zapata (B). El segundo es por nivel freático, por lo que el factor se considera igual a uno pues no se ha registrado napa freática hasta una profundidad igual a diez metros. Por último, el tercero es por capa comprimida, para lo cual se utilizó la figura 3. Este factor depende de la relación entre el espesor del estrato de apoyo (T) y el ancho de la zapata (B). La tabla 10 muestra los datos de entrada necesarios para la aplicación de este modelo.

Tabla 10. Datos de entrada necesarios para aplicar el modelo de Parry (1971)

| COMBINACIÓN | Parry | | | | | | | | | |
|--------------------|--------|---------------------------|--------|--------|-------|------|----|-----|-------|------|
| | B' (m) | Qap (ton/m ²) | z=3/4B | N60 | Df/B | CD | CW | T | T/B | CT |
| CM+CV | 1.600 | 24.97 | 1.20 | 20.328 | 0.750 | 1.63 | 1 | 1.8 | 1.125 | 0.68 |
| CM+CV+SismoXX/1.25 | 1.600 | 26.27 | 1.20 | 20.328 | 0.750 | 1.63 | 1 | 1.8 | 1.125 | 0.68 |
| CM+CV+SismoYY/1.25 | 1.598 | 26.07 | 1.20 | 20.328 | 0.751 | 1.63 | 1 | 1.8 | 1.127 | 0.68 |

Fuente: Elaboración propia.

d) Burland & Burbidge (1985)

Dadas las características del suelo, se utilizó la ecuación (15), para suelos normalmente consolidados. Este modelo depende del ancho de la zapata (B'), la presión aplicada (Q_{ap}) y el índice de compresibilidad. Este último depende del número golpes del ensayo SPT (N_{60}), el cual es el promedio de los valores obtenidos en este ensayo entre la profundidad de la zapata y una distancia igual a Z por debajo de esta.

Asimismo, el asentamiento calculado es corregido por dos factores. El primer factor de corrección es por la forma de la zapata, el cual depende del factor (L'/B'). El segundo factor es por estrato rígido, el cual, para este caso, es igual a uno, dado que la distancia desde el fondo de la zapata hasta el estrato rígido es mayor a la zona de influencia de la zapata (Z). Los datos de entrada requeridos por este modelo se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Datos de entrada necesarios para aplicar el modelo de Parry (1971)

| COMBINACIÓN | Burland y Burbridge | | | | | | |
|--------------------|---------------------|--------------------------------|------|----------|-------|--------|-------|
| | B' (m) | Q_{ap} (ton/m ²) | z | N_{60} | I_c | C_s | C_i |
| CM+CV | 1.600 | 24.97 | 1.99 | 20.328 | 0.025 | 1 | 1 |
| CM+CV+SismoXX/1.25 | 1.600 | 26.27 | 1.99 | 20.328 | 0.025 | 0.9837 | 1 |
| CM+CV+SismoYY/1.25 | 1.598 | 26.07 | 1.99 | 20.328 | 0.025 | 0.9997 | 1 |

Fuente: Elaboración propia.

e) Terzaghi, Peck & Mesri (1996)

Para el cálculo mediante este método se utilizó la ecuación (22). Este modelo requiere como datos de entrada la presión aplicada (Q_{ap}), el ancho efectivo de la zapata (B'), el factor de forma (F_f) y el número de golpes del ensayo SPT (N_{60}). El factor de forma, a su vez, depende de las dimensiones de la zapata (L' y B') y el valor N_{60} es el promedio de los resultados del ensayo SPT entre la profundidad de la zapata y una distancia igual a Z por debajo de esta. La tabla 12 muestra cada uno los valores mencionados anteriormente.

Tabla 12. Datos de entrada necesarios para aplicar el modelo de Parry (1971)

| COMBINACIÓN | Terzaghi, Peck & Mesri | | | | |
|--------------------|------------------------|--------------------------------|---------|----------|-------|
| | B' (m) | Q_{ap} (ton/m ²) | Z (m) | N_{60} | F_f |
| CM+CV | 1.600 | 24.97 | 1.42 | 20.328 | 1.000 |
| CM+CV+SismoXX/1.25 | 1.600 | 26.27 | 1.42 | 20.328 | 1.017 |
| CM+CV+SismoYY/1.25 | 1.598 | 26.07 | 1.42 | 20.328 | 1.000 |

Fuente: Elaboración propia.

3.1.4. Comparación de resultados

Los resultados obtenidos serán comparados porcentual con el asentamiento calculado mediante el método de Terzaghi, Peck & Mesri (1996) y se determinará el porcentaje de variación respecto a este método. Finalmente, a partir de las variables de la cual depende cada uno de estos métodos y los resultados obtenidos, se determinaron las posibles razones de las variaciones en el cálculo de asentamiento en suelos granulares.

3.2. Resultados

Una vez obtenidas las variables necesarias para calcular los asentamientos se reemplazan estas variables en las ecuaciones respectivas de cada método y se obtiene el asentamiento en la zapata por combinación de carga. A continuación, la tabla muestra los asentamientos obtenidos por cada método y combinación de cargas.

Tabla 13. Asentamientos calculados por cada metodología estudiada

| Asentamiento (mm) | COMBINACIÓN DE CARGAS | | |
|-------------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| | CM+CV | CM+CV+SismoXX/1.25 | CM+CV+SismoYY/1.25 |
| Terzaghi, Peck & Mesri (1996) | 13.97 | 14.46 | 14.56 |
| Meyerhof (1965) | 13.19 | 13.88 | 13.76 |
| Burland & Burbidge (1985) | 8.58 | 8.88 | 8.95 |
| Parry (1971) | 4.27 | 4.50 | 4.45 |
| D'Apollonia (1970) | 10.25 | 10.78 | 10.68 |

Fuente: Elaboración propia.

Al tomar como referencia el asentamiento hallado por el método de Terzaghi, Peck & Mesri como el más cercano al real puesto que con ese método se realizó el diseño de la zapata, se procede a comparar los demás asentamientos mediante un porcentaje de variación respecto al asentamiento ya mencionado. Esta comparación se muestra en la tabla 14.

Tabla 14. Comparación de resultados

| Método | Asentamiento obtenido para tipo de carga (mm) | | Variación porcentual con respecto al método de Terzaghi, Peck & Mesri (1996) |
|---------------------------|---|-------|--|
| Meyerhof (1965) | CM+CV | 13.19 | -5.58% |
| | CM+CV+SismoXX/1.25 | 13.88 | -4.01% |
| | CM+CV+SismoYY/1.25 | 13.76 | -5.49% |
| Burland & Burbidge (1985) | CM+CV | 8.37 | -40.09% |
| | CM+CV+SismoXX/1.25 | 8.66 | -40.11% |
| | CM+CV+SismoYY/1.25 | 8.73 | -40.04% |
| Parry (1971) | CM+CV | 4.27 | -69.43% |
| | CM+CV+SismoXX/1.25 | 4.5 | -68.88% |
| | CM+CV+SismoYY/1.25 | 4.45 | -69.44% |
| D'Apollonia (1970) | CM+CV | 10.25 | -26.63% |
| | CM+CV+SismoXX/1.25 | 10.78 | -25.45% |
| | CM+CV+SismoYY/1.25 | 10.68 | -26.65% |

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Discusión

Una vez obtenidas las variaciones porcentuales de cada método respecto al de Terzaghi, Peck & Mesri (1996), se procederá a discutir cada resultado obtenido y los posibles factores que afecten al resultado final del asentamiento obtenido. Cabe mencionar que hay dos factores que no influyen en esta variación de los métodos y los cuales no serán discutidos; el primero es el factor de forma, ya que la zapata es cuadrada y este factor es 1 en todos los casos; el segundo es la corrección por napa freática, ya que esta no se encuentra presente y no influye en el cálculo de asentamientos de ninguno de los métodos.

Terzaghi, Peck & Mesri (1996)

Como se mencionó, al diseñar la zapata mediante este método se asume que el asentamiento obtenido mediante la fórmula será igual o muy parecido al asentamiento real, por lo que se toma como referencia al momento de comparar con los otros resultados. Debido a que se diseña con este método y no hay otro con el cual compararlo se debería de medir el asentamiento real del edificio mediante el uso de equipos topográficos con el fin de determinar qué tan preciso es el asentamiento calculado.

Si se compara el asentamiento calculado mediante este método con los demás vendría a ser el mayor; por lo tanto, se puede concluir que es el método más conservador. Esto se debe principalmente a que este método considera que el asentamiento real es 1.6 veces el asentamiento calculado, añadiendo así un factor extra que aumenta el asentamiento obtenido mediante fórmula y que hace que el método sea más conservador. Al diseñar por este método se obtienen dimensiones de zapata más grandes a que si se diseñara con otro método.

Meyerhof (1965)

El porcentaje de variación de este método con respecto al método de Terzaghi, Peck & Mesri (1996) es de 5% aproximadamente, siendo el menor de todos. Con este porcentaje se puede decir que ambos métodos tienen bastante similitud. Esta similitud de resultados podría tratarse debido a que ambos métodos se basan principalmente en el método de Terzaghi & Peck del año 1948; si bien ambos métodos modifican la ecuación inicial y toman como referencia otros estudios (las modificaciones hechas por Mesri en 1996 incluyen los estudios realizados por Burland & Burbidge en 1985), no deberían existir dudas respecto a que ambos métodos presenten resultados casi iguales.

Si bien se podría aplicar el factor de 1.6 para el método de Meyerhof, de igual forma que se aplicó para el de Terzaghi, Peck & Mesri con el fin de incrementar el valor para acercarlo a la realidad, se debe considerar que el método de Meyerhof ya considera un incremento de 50% sobre el método original de Terzaghi & Peck, por lo que se debe analizar con más detalle si es que se debe añadir otro factor de incremento.

Burland & Burbidge (1985)

Este método presenta una variación porcentual considerable; esto difiere de lo explicado en el método de Terzaghi, Peck & Mesri, ya que Mesri se basó también en este método para determinar las modificaciones necesarias para la fórmula de Terzaghi & Peck. La única observación que se le podría realizar a este método es que no cuenta con el factor de 1.6; esto es un poco contradictorio, ya que fueron los mismos Burland & Burbidge los que estimaron este factor para convertir los asentamientos calculados en asentamientos reales. Entonces, si multiplicamos los asentamientos calculados por este factor obtenemos una variación porcentual mucho menor; esto puede observarse mejor en la tabla 15.

Tabla 15. Asentamiento y variación porcentual obtenida por el método de Burland & Burbidge (1985) aplicando un factor de 1.6.

| | Método de Burland & Burbidge (aplicando un factor de 1.6 al asentamiento calculado) | Variación porcentual |
|--------------------|---|----------------------|
| Combinación | Mm | % |
| CM+CV | 13.73 | -1.74% |
| CM+CV+SismoXX/1.25 | 14.21 | -1.74% |
| CM+CV+SismoYY/1.25 | 14.31 | -1.75% |

Fuente: Elaboración propia

Parry (1971)

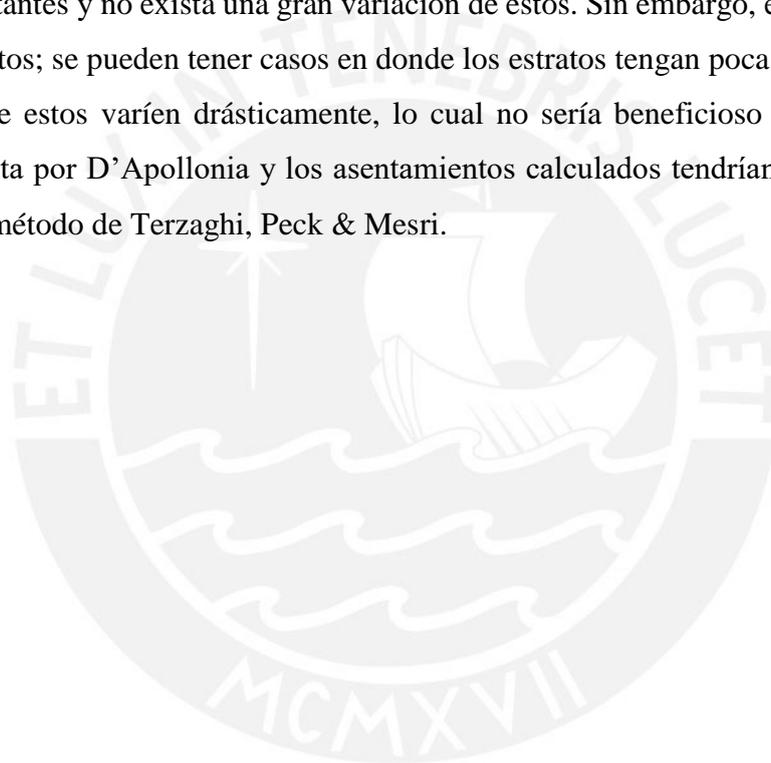
El asentamiento calculado mediante este método es el que mayor variación porcentual presenta con un aproximado de 69%. Al ser el menor asentamiento obtenido de todos los métodos es el menos conservador; además, al diseñar las zapatas utilizando este método, se obtendrían las menos dimensiones, a comparación con los otros métodos. Los factores que influyen en la gran variación porcentual que se tiene en este método serán explicados a continuación.

Primero, el factor C_T influye de manera significativa ya que este es 0.68; este factor es directamente proporcional a la relación entre el espesor del estrato sobre el cual se apoya la cimentación y el ancho de la zapata. Entonces, si se tiene una dimensión de zapata elevada (la cual fue diseñada con el método más conservador de los cinco) esta relación se hace más pequeña y, por lo tanto, arroja un valor de C_T más bajo, por lo que el asentamiento también disminuye. Al ser este método menos conservador debería considerarse un factor para la C_T de manera que no afecte significativamente el cálculo de los asentamientos.

Finalmente, se debe mencionar la influencia del factor α ; Parry menciona que este factor fue hallado mediante la comparación de su ecuación propuesta con los resultados de una serie de ensayos de placa, obteniendo variaciones de α entre 84 y 284; menciona además que se escogió el valor de 200 por ser ligeramente conservador. Tal vez, si bien el valor de α no es significativamente influyente en la gran porcentual obtenida, se podría ajustar el valor de α mediante una fórmula que considere una relación entre el ancho de la cimentación y de la placa utilizada en los ensayos con el fin de hacer más preciso este valor; o también, con el fin de hacer este método más conservador, podría considerarse tomar el mayor valor de α de 284.

D'Apollonia (1970)

Después del método de Meyerhof, este método tiene la menor variación porcentual con respecto al método de Terzaghi, Peck & Mesri con un poco más del 25%. Si bien no se puede concluir que existe bastante similitud entre ambos métodos, el método de D'Apollonia no tiene tanta variación como el de Parry o Burland & Burbidge. Un punto a favor que evita un desfase alto entre ambos métodos es que, como se mencionó anteriormente, D'Apollonia considera a la arena como un sólido elástico, homogéneo e isotrópico; esta suposición funciona muy bien en el caso del proyecto de estudio, ya que el estrato de arena sobre el cual se apoya la zapata tiene una gran profundidad (1.8m) y permite que los módulos de elasticidad y Poisson calculados se mantengan constantes y no exista una gran variación de estos. Sin embargo, esto no aplica para todos los proyectos; se pueden tener casos en donde los estratos tengan poca profundidad y las características de estos varíen drásticamente, lo cual no sería beneficioso para el uso de la fórmula propuesta por D'Apollonia y los asentamientos calculados tendrían mucha variación con respecto al método de Terzaghi, Peck & Mesri.



CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES

La presente investigación tiene como objetivo evaluar los resultados obtenidos al aplicar cinco métodos para el cálculo de asentamiento en suelos granulares. Para lograr ello, primero, se estableció cinco métodos diferentes para el cálculo de asentamiento en suelos granulares. Luego, se definió los parámetros y variables requeridos para cada método, y se calculó el asentamiento para una zapata con cada método. Finalmente, se comparó la variabilidad de los resultados y se discutió los resultados obtenidos. Las conclusiones relacionadas a cada uno de estos objetivos se detallarán en este acápite.

La determinación de los métodos que se utilizaron para calcular el asentamiento se basó en los datos que se tuvieron al momento de realizar la investigación. Al solo haber realizado ensayos de penetración estándar en el suelo del proyecto, los métodos analizados tienen en común el uso del número de golpes obtenido mediante este ensayo para la estimación del asentamiento. Entre los métodos basados en este ensayo, se tienen los propuestos por Peck & Bazaraa (1969), Berardi & Lancellotta (1991) y los cinco métodos estudiados en líneas arriba. Sin embargo, se cuenta también con los métodos de Schmertmann (1970 y 1978), Beer & Martens (1965), entre otros, los cuales consideran en sus fórmulas resultados obtenidos mediante el ensayo de cono de penetración (CPT). Añadir estos métodos al análisis reforzaría la investigación, ya que se tendría una perspectiva diferente que incluye datos obtenidos mediante otros ensayos de campo diferente al de penetración estándar.

Los cinco métodos estudiados requieren principalmente tres variables: carga aplicada, ancho de la zapata y número de golpes del ensayo SPT. Asimismo, entre los factores de corrección que posee cada método, encontramos correcciones por nivel freático, por empotramiento, por estrato rígido y por la forma de la cimentación. Para el cálculo de estos factores se requiere conocer el largo de la zapata, el nivel freático, la profundidad de la cimentación, el espesor de los estratos, entre otro. Para conocer las variables necesarias para la utilización de estos métodos fue necesario recolectar la información de un estudio de mecánica de suelos realizado por los autores de esta investigación, en el cual se detalla las características del suelo de la zapata a evaluar; así como las características de la zapata y las cargas actuantes sobre ella. A partir de estos, se pudo calcular el asentamiento por cada uno de estos métodos y se obtuvo valores entre 4.27 mm y 14.56 mm, para tres diferentes combinaciones de carga.

Cabe señalar que esta zapata fue diseñada aplicando el método de Terzaghi, Peck & Mesri (1996), por lo que el asentamiento obtenido por este método fue tomado como referencia.

En cuanto a la variación de resultados, se identificó una variación de 5% aproximadamente entre los resultados obtenidos mediante el modelo de Meyerhof y Terzaghi, Peck & Mesri. Esto se debería a que Meyerhof considera un incremento de 50% en la capacidad de carga propuesta por el método original de Terzaghi & Peck (1948). Esta asunción lo haría similar al modelo de Terzaghi, Peck & Mesri (1996), el cual considera un factor de 1.6 sobre los asentamientos, debido a las investigaciones de Burland & Burbidge (1985). Por otro lado, el modelo propuesto por estos últimos presenta una variación alrededor del 40% respecto a los resultados de Terzaghi, Peck & Mesri. Esta diferencia se debería a que el modelo no consideró el valor 1.6 que proponen en su misma investigación, el cual, como se ha mencionado, incluye Terzaghi, Peck & Mesri. Asimismo, se ha demostrado que, si se hubiese considerado este valor, la variación entre estos métodos sería prácticamente nula.

Respecto al método de Parry (1971), se ha identificado la mayor variación en relación al valor que se ha tomado como referencia, la cual se encuentra alrededor del 69%. En cuanto al principal factor que afecta este resultado y produce esta variación se pueden mencionar el siguiente. Se induce al error mediante la incorporación a la fórmula de una variable que no contempla todos los casos en los cuales es utilizada la ecuación; esto se puede observar en el factor C_T del método, el cual no contemplaba una dimensión de zapata conservativa o el factor α , del mismo método, cuyos valores tenían un amplio valor de aceptación, pero que solo contemplaba un único valor de este. Respecto al método D'Apollonia, se ha obtenido una variación alrededor del 25% respecto al valor de referencia asumido. Esta variación podría deberse a las hipótesis asumidas previo a el planteamiento de la ecuación. Este modelo asume al estrato de suelo como un sólido elástico, homogéneo e isótropo al momento de elaborar su método. En el caso de la zapata analizada, esta hipótesis cumple, por lo que se tiene una variación no tan elevada, pero no en todos los casos lo hará.

Si bien se han encontrado factores que afectan al cálculo de asentamientos mediante la comparación de diferentes métodos, hay que mencionar que esto dependerá del proyecto que se esté analizando; las condiciones y propiedades del suelo influyen considerablemente en la obtención del asentamiento y tal vez un método que no haya tenido éxito en el cálculo de asentamientos en un proyecto, si lo haga para otro. Es necesario entonces realizar múltiples análisis en diferentes proyectos de edificación con diferentes tipos de suelo granular con el fin

de determinar los métodos apropiados para el cálculo de asentamientos y que varíen dependiendo de las condiciones del suelo granular. Asimismo, si bien se encuentra consistencia en tres de los métodos analizados y un porcentaje de error considerable en los otros dos, se puede reforzar la investigación añadiendo más métodos al análisis y que consideren resultados obtenidos mediante otros ensayos de laboratorio. Por último, es necesario conocer el asentamiento real producido en una zapata para realizar una correcta comparación y no asumir un valor referencial.



BIBLIOGRAFÍA

- Berardi, R., & Lancellotta, R. (1991). Stiffness of granular soils from field performance. *Geotechnique*, 41(1), 149-157.
- Berry, P. L. & Reid, D. (1993). *Mecánica de suelo*. Santa Fé de Bogotá: McGraw-Hill
- Brown, J. D., & Meyerhof, G. G. (1969). Experimental study of bearing capacity in layered clays. In *Soil Mech & Fdn Eng Conf Proc/Mexico/*.
- Burland, J. B., & Burbidge, M. C. (1985). Settlements of foundations on sand and gravel UK: *Proceedings Inst. Civil Engineers, Part, 1*, 78.
- Carrier, W.D. and Christian, J.T. (1973) "Rigid Circular Plate Resting on a Non-Homogeneous Elastic Half-Space." *Geotechnique*, Vol. 23, No. I, pp. 67-84.
- Comité Técnico de Normalización de la Norma Técnica E.050 del Reglamento Nacional de Edificaciones (2018). *Norma Técnica E.050 "Suelos y Cimentaciones"*. Lima: El Peruano
- Das, B.M., (1983) *Principles of Foundation Engineering*. Wadsworth, Inc., Belmont, Calif.
- Das, B., & Sivakugan, N. (2007). Settlements of shallow foundations on granular soil—an overview. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1(1), 19-29.
- D'Appolonia, D.J., D'Appolonia, E., and Brissette, R.F. (1968). "Settlement of Spread Footings on Sand." *Journal Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 94, SM3, pp. 735-760.
- D'Appolonia, D.J., D'Appolonia, E., and Brissette, R.F. (1970). "Settlement of Spread Footings on Sand". *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 96, No. SM2, pp. 754-761.
- Janbu, N., Bjerrum, L. and Kjaemli, B., 1956. "Vetledning ved Losning au Fundamentering Soppgauer." *Norwegian Geotechnical Institute, Publication No. 16*.
- Meyerhof, G. G. (1965). Shallow foundations. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 91(Proc. Paper 4275).

- Parry, R.H.G. (1971). "A Direct Method of Estimating Settlements in Sand from SPT Values." Proceedings of the Conference of the Midlands Soil Mechanics and Foundation Engineering Society, pp. 29-37.
- Peck, R.B., and Bazaraa, A.R.S.S. (1969). "Discussion of Settlement of spread-footings on sand." J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, 95(SM3), 305-309.
- Picón, A. & Ruiz, L. (2019). Análisis del problema de interacción suelo – estructura para un pórtico 2D en suelos granulares. PUCP
- Schmertmann, J.H. (1970) "Static Cone to Compute Static Settlement Over Sand." Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 96, No. SM3, pp. 1011-1043.
- Schmertmann, J. H. (1978). Guidelines for cone penetration test: performance and design (No. FHWA-TS-78-209). United States. Federal Highway Administration.
- Terzaghi, K., and Peck, R.B. (1948). Soil mechanics in engineering practice, 1st Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). Soil mechanics in engineering practice. John Wiley & Sons.