

**Análisis Comparativo con Modelos Numéricos para el Estudio de Capacidad Portante en  
Medios Homogéneos y Estratificados**

**Nicolás Campo Ortiz y Neil Javier Badrán Lizarazo**

**Trabajo presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil**

**Director**

**Vladimir Ernesto Merchán Jaimes**

**Doctor en Ingeniería**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Bucaramanga**

**2020**

**Dedicatoria**

*Dedicado a mi madre por ser una mujer valiente, fuerte y de un corazón grande que me ha dado todo para ser lo que soy ahora, la amo con todo mi corazón.*

*Nicolás Campo Ortiz*

*Tan importante y anhelado logro va dedicado especialmente a mis padres, quienes a pesar de todo nunca perdieron la fe en mí, ellos son el mayor motivo por el cual sigo adelante y nunca me rindo.*

*Neil Javier Badran Lizarazo*

### Agradecimientos

*Darle gracias a Dios por nunca desampararme. Gracias al ingeniero Vladimir Ernesto Merchán Jaimes por guiarme en el desarrollo de este proyecto de investigación. Gracias a Karen Andrea Moreno Rodríguez, por darme su amor y su apoyo incondicional cuando más lo necesité. Gracias a mis abuelos y a mi padre por estar presentes en todo momento a lo largo de esta carrera universitaria.*

***Nicolás Campo Ortiz***

*Principalmente agradecer a Dios, ese ser omnipotente que siempre escucho mis plegarias a lo largo de mi carrera. Gracias a mi familia entera, y a mis hermanos quienes se encargaron de marcar el camino que debo recorrer para alcanzar el éxito.*

***Neil Javier Badran Lizarazo***

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Objetivos.....	15
1.1 Objetivo General.....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Marco referencial .....	16
2.1 Capacidad portante.....	16
2.2 Teoría de Terzaghi .....	16
2.3 Teoría de Meyerhof.....	19
2.4 Criterio de rotura lineal de Mohr-Coulomb .....	21
3. Metodología .....	22
3.1 Aspectos de diseño.....	22
3.1.1 Profundidad de cimentación .....	23
3.1.2 Dimensiones del cimiento.....	23
3.1.3 Parámetros geotécnicos.....	24
3.1.4 Capacidad portante.....	25
3.2 Aplicación del programa GEO5 para el cálculo de capacidad portante por Método de Elementos Finitos.....	28

3.2.1 Fase 1: Modelamiento topológico.....	30
3.2.2 Fase 2: Modelo de análisis de suelo por gravedad.....	33
3.2.3 Fase 3: Análisis de suelo con aplicación de carga superficial .....	35
3.3 Cálculo de sensibilidad del software GEO5 .....	35
4. Análisis de resultados .....	36
4.1 Resultados de la capacidad portante en suelos homogéneos .....	36
4.2 Análisis de resultados de sensibilidad en la interfaz del software .....	37
4.3 Resultados de la influencia del ángulo de fricción para cálculo de capacidad portante .....	43
4.4 Resultados de variaciones en el peso unitario para el cálculo de capacidad portante .....	45
4.5 Resultados de variaciones en el módulo elástico para el cálculo de capacidad portante.....	47
4.6 Resultados de variaciones en la cohesión para el cálculo de capacidad portante .....	49
4.7 Capacidad portante para suelo limo arenoso (Terzaghi, Meyerhof y GEO5).....	50
4.8 Análisis de resultados de capacidad portante en suelos estratificados por el método de elementos finitos (MEF). .....	51
4.8.1 Perfil tipo 1 .....	52
4.8.2 Perfil tipo 2 .....	53
4.8.3 Perfil tipo 3 .....	54
4.8.4 Perfil tipo 4 .....	55
5. Conclusiones .....	56
Referencias Bibliográficas .....	59

## Lista de Tablas

	<b>Pag.</b>
Tabla 1. Parámetros geotécnicos de suelo arenosos para análisis de capacidad portante.....	25
Tabla 2. Geometría de perfiles de suelo tipo A utilizados en el software.....	31
Tabla 3. Geometría de perfiles de suelo tipo B utilizados en el softwar.....	31
Tabla 4. Geometría de perfiles de suelos estratificados utilizados en el software.....	32
Tabla 5. Valores de capacidad portante para arena bien gradada a partir de los parámetros elásticos y de resistencia del caso base.....	37
Tabla 6. Valores de asentamientos inmediatos obtenidos por el método de Meyerhof en perfiles homogéneos Tipo A.....	38
Tabla 7. Valores de asentamientos inmediatos obtenidos por el método de Terzaghi en perfiles homogéneos Tipo A.....	39
Tabla 8. Valores de asentamientos inmediatos obtenidos por el método de elementos finitos GEO5 en perfiles homogéneos tipo A.....	40
Tabla 9. Análisis para suelo tipo 1 con variaciones de peso unitario.....	46
Tabla 10. Parámetros de suelo limo arenoso para el cálculo de capacidad portante.....	50

## Lista de Figuras

	<b>Pag.</b>
Figura 1. <i>Falla por capacidad de carga en un suelo bajo una cimentación rígida continua. ....</i>	17
Figura 2. <i>Mecanismo de falla de Meyerhof. ....</i>	20
Figura 3. <i>Representación de la envolvente de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones normal y tangencial. Modificada de según Melentijevic, 2005. ....</i>	22
Figura 4. <i>Modelo de malla de elementos finitos para perfil de suelo tipo 2.....</i>	33
Figura 5. <i>Esfuerzos efectivos <math>\sigma_z</math> del suelo sin carga externa, solo actúa fuerzas gravitatorias. ..</i>	34

## Lista de Graficas

	<b>Pag.</b>
Gráfica 1. Asentamientos inmediatos generados aplicando capacidad portante última de Meyerhof (145 KN/m <sup>2</sup> ).....	38
Gráfica 2. Asentamientos inmediatos generados aplicando capacidad portante última de Terzaghi (177 KN/m <sup>2</sup> ).....	39
Gráfica 3. Asentamientos inmediatos generados aplicando capacidad portante última de GEO5 (219 KN/m <sup>2</sup> ).....	40
Gráfica 4. Asentamientos inmediatos generados por el método de Meyerhof en los perfiles homogéneos Tipo A y Tipo B.....	42
Gráfica 5. Asentamientos inmediatos generados por el MEF en los perfiles homogéneos Tipo A y Tipo B. ....	42
Gráfica 6. Comportamiento de la capacidad portante según ángulo de fricción en un suelo seco. .....	44
Gráfica 7. Comportamiento de capacidad portante según ángulo de fricción en un suelo saturado. .....	44
Gráfica 8. Comportamiento de la capacidad portante según peso unitario ( $\gamma_t$ ).....	46
Gráfica 9. Comportamiento de la capacidad portante según peso unitario en condición de saturación ( $\gamma_{sat}$ ). ....	47

Gráfica 10. Comportamiento de la capacidad portante según el módulo elástico en un suelo seco. .....	48
Gráfica 11. Comportamiento de la capacidad portante según la cohesión en arena seca. ....	49
Gráfica 12. Capacidad portante en suelo limo arenoso seco y en condiciones de saturación. ....	51
Gráfica 13. Capacidad portante última para un suelo estratificado (arena estrato superior E=20 MPa y limo arenoso estrato inferior E=20 MPa). ....	53
Gráfica 14. Capacidad portante última para un suelo estratificado (limo arenoso estrato superior E=20 MPa y arena estrato inferior E=20 MPa). ....	54
Gráfica 15. Capacidad portante última para un suelo estratificado (arena estrato superior E=20 MPa y limo arenoso inferior E=40 MPa). ....	55
Gráfica 16. Capacidad de carga para un suelo estratificado (limo arenoso estrato superior E=20 MPa y arena inferior E=40 MPa). ....	56

**Resumen**

**Título:** Análisis Comparativo Con Modelos Numéricos Para El Estudio De Capacidad Portante En Medios Homogéneos Y Estratificados. \*

**Autora:** Nicolás Campo Ortiz, Neil Javier Badrán Lizarazo \*\*

**Palabras Claves:** Modelos Numéricos, Capacidad Portante, Suelo Estratificado, Suelo De Fundación, Esfuerzo Efectivo, Peso Unitario.

**Descripción:**

Este proyecto tiene como finalidad comparar los resultados obtenidos con modelos numéricos, para realizar el estudio de capacidad portante en medios homogéneos y estratificados. Para ello, se llevó a cabo un análisis basado en dos métodos: el primero, mediante un software que facilita soluciones geotécnicas a través de elementos finitos y el segundo, realizando el análisis por medio de ecuaciones clásicas de capacidad portante. Por lo anterior, se estudió el efecto de la geometría, rigidez, parámetros elásticos y de resistencia de suelos homogéneos y estratificados en el programa de elementos finitos con el propósito de obtener resultados del comportamiento de dichos suelos, los cuales fueron comparados con las soluciones encontradas a partir de las ecuaciones de Meyerhof y Terzaghi. A nivel de parámetros geotécnicos del suelo, cabe recalcar que los análisis están basados en el uso de un modelo del suelo elástico-plástico perfecto como lo es el modelo de Mohr-Coulomb. Adicionalmente, los análisis de capacidad portante fueron realizados con cimentaciones corridas las cuales presentan dimensiones en profundidad mucho mayores que en su base. Los resultados del análisis comparativo evidencian que las nuevas herramientas que trabajan con el método de elementos finitos son de gran ayuda para realizar estudios geotécnicos, otorgando resultados más precisos y en la misma línea de tendencia de las ecuaciones clásicas planteadas hace varios años atrás.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, Doctor en Ingeniería

### Abstract

**Title:** Comparative Analysis With Numerical Models For The Study Of Carrying Capacity In Homogenous And Layered Media \*

**Author:** Nicolás Campo Ortiz, Neil Javier Badrán Lizarazo \*\*

**Keywords:** Numerical Models, Bearing Capacity, Stratified Soil, Foundation Soil, Effective Stress, Unit Weight.

### Description:

The present project's goal is to compare the results obtained using numerical models, to carry out the study of bearing capacity in stratified and homogenous mediums. To that end, an analysis based on two methods was performed, the first, utilizing a software that facilitates geotechnical solutions using finite elements and the second, performing the analysis through the classic equations for bearing capacity. Taking the above into account, the effect of geometry, rigidity, elastic parameters and homogenous and stratified soil resistance were studied in the software using finite elements with the purpose of obtaining the behavior of said soils, which were compared with the results found for the Terzaghi and Meyerhof equations. At the level of geotechnical parameters of the soil, it should be emphasized that the analyzes are based on the use of a perfect elastic-plastic soil model such as the Mohr-Coulomb model. Additionally, the bearing capacity analyzes were carried out with continuous foundations which present dimensions in depth much greater than at their base. The results of the comparative analysis evidence the great help that the new tools, which use the finite element method, provide to perform geotechnical studies, giving more accurate results along the same tendency line of the classic equations posed many years before.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physical Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, Engineering doctor.

## Introducción

Uno de los problemas fundamentales en la determinación de la capacidad portante última de los suelos es el poder estimar el tipo de rotura asociado. Lo anterior, teniendo en cuenta que la solución clásica asume un material rígido que falla cinemáticamente mediante la interacción de tres cuñas de falla (Terzaghi, como se citó en Das, 2012). Vesic (como se citó en Das, 2012) estableció a partir de modelos físicos, sobre arena, una posible discretización de los modos de falla (general, local y punzonamiento) como una función de la densidad relativa del depósito arenoso y de un parámetro adimensional asociado a las dimensiones del cimiento y la profundidad de desplante. Sin embargo, su aplicabilidad en materiales con granulometrías mezcladas es todavía incierto. Incluso, Terzaghi (como se citó en Das, 2012) planteó la reducción de los parámetros de resistencia pico para tener en cuenta la falla local. Meyerhof y Hansen, optan por sólo asumir una condición de falla general aplicable a suelos rígidos. En su trabajo de 1973, Vesic (como se citó en Das, 2012) propuso incluir factores de compresibilidad del suelo, mediante la determinación de un índice de rigidez. Este es quizás el esfuerzo más importante para tratar de incluir la influencia de la rigidez del suelo dentro del análisis. Con el desarrollo de la computación, la técnica de los elementos finitos ha permitido el desarrollo de aplicaciones importantes para la ingeniería civil. A pesar de que el concepto clásico de la técnica de elementos finitos está enmarcado dentro del escenario de pequeñas deformaciones, se han realizado esfuerzos importantes para intentar estudiar la condición de rotura en los materiales.

Este aspecto, ha hecho que hoy en día se puedan realizar con esta técnica análisis de deformaciones y de rotura de materiales.

El estudio de las fundaciones se basa principalmente en dos aspectos fundamentales, como lo son, las deformaciones del suelo dependiendo de sus características y la capacidad para soportar una carga. Esto permite establecer una idea del comportamiento de la cimentación y si este será satisfactorio o puede presentar alguna falla. La búsqueda de la precisión de dichos aspectos se remonta mucho tiempo atrás con los aportes de grandes contribuyentes de la mecánica de suelos y más reciente apoyada por la tecnología con programas capaces de utilizar el método de elementos finitos (MEF), el cual, analiza problemas muy complejos de una manera rápida y cumpliendo con las leyes de la física.

Con base en lo anteriormente expuesto, el objetivo de esta investigación es la comparación de la estimación de la capacidad de soporte que tienen los suelos, entre la solución basada en las teorías clásicas anteriormente mencionadas y haciendo uso de un software de elementos finitos. Se busca establecer que tan acoplado está el programa para la solución de los interrogantes del estudio de los suelos. En particular, se estudiará el efecto de la geometría y el número de elementos en la solución numérica, la influencia de la rigidez y de los parámetros elásticos y de resistencia en los modos de falla de los modelos numéricos y su relación con las teorías clásicas entre otros aspectos. Para esto se asume el suelo como un material elasto-plástico con el criterio de falla Mohr-Coulomb. Aunque el método de elementos finitos no está concebido para manejar la rotura, sino para análisis de deformaciones.

Por facilidad de análisis de datos y características de los cimientos corridos, serán estos los que se utilizarán en el proyecto. Esto representa desde el punto de vista numérico, que el

problema se pueda trabajar bajo condiciones planas de deformación, con lo cual la simulación en 2D es adecuada, reduciendo el costo computacional y evitando problemas de convergencia.

Adicionalmente se considerarán análisis a corto plazo (condiciones no drenadas) y análisis a largo plazo (condiciones drenadas) del suelo de fundación.

Para finalizar, la aplicación de la carga sobre el suelo se hará sobre la superficie, no se tendrá en cuenta la profundidad de excavación para la cimentación.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Realizar un estudio comparativo entre los resultados ofrecidos por metodologías clásicas para el cálculo de capacidad portante última de suelos homogéneos y estratificados y el análisis por la técnica de elementos finitos.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Estudiar la influencia de aspectos geométricos como el número de elementos y las condiciones de borde en los resultados de capacidad portante última.

Estudiar la influencia de la rigidez del suelo en los modos de falla del mismo.

Realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros de resistencia del suelo en la magnitud de la capacidad portante última del suelo.

## 2. Marco referencial

### 2.1 Capacidad portante

De acuerdo con Naranjo y Dranichnikov (2012):

En la ingeniería geotécnica se denomina capacidad portante a la capacidad del suelo para soportar las cargas aplicadas sobre él.

Técnicamente la capacidad portante es la máxima presión media de contacto entre la cimentación y el suelo, tal que no se produzca un fallo por cortante del suelo o un asentamiento diferencial excesivo. Por tanto, la capacidad portante admisible debe estar basada en uno de los siguientes criterios funcionales:

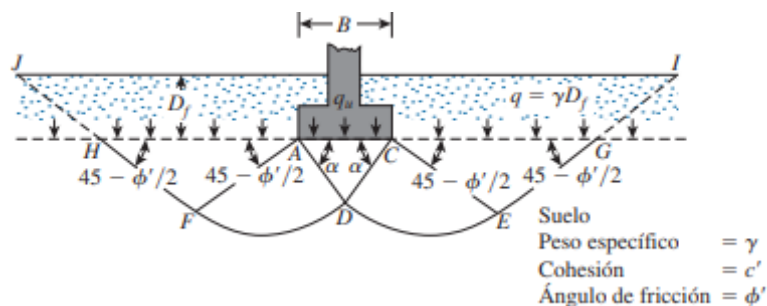
- Si lo que se busca es un equilibrio entre el esfuerzo aplicado al suelo y la deformación sufrida por este, deberá calcularse la capacidad portante a partir de criterios de asentamiento admisible.
- Si la función del suelo de cimentación es soportar un determinado esfuerzo independientemente de la deformación, la capacidad portante se denomina carga de hundimiento o capacidad portante última (p. 15).

## 2.2 Teoría de Terzaghi

Terzaghi (1943) fue el primero en presentar una teoría para evaluar la capacidad última de carga de cimentaciones superficiales, la cual dice que una cimentación es superficial si la profundidad  $D_f$  de la cimentación es menor que o igual al ancho de la misma. Sin embargo, investigadores posteriores han sugerido que cimentaciones con  $D_f$  igual a 3 o 4 veces el ancho de la cimentación se definen como cimentaciones superficiales (Flores, s.f, p.1).

**Figura 1.**

*Falla por capacidad de carga en un suelo bajo una cimentación rígida continua.*



Terzaghi sugirió que para una cimentación corrida o de franja (es decir, la razón de ancho a largo de la cimentación tiende a 0), la superficie de falla en un suelo bajo carga última se supone similar a la mostrada en la figura, (Note que este es el caso de la falla cortante general). El efecto del suelo arriba del fondo de la cimentación se supone reemplazado por el efecto de una sobrecarga equivalente  $q = \gamma D_f$  (donde  $\gamma$  = peso específico del suelo). La zona de falla bajo la cimentación se separa en tres partes (Flores, s.f, p.1-2).

En su planteamiento, Terzaghi, llega a la propuesta de una ecuación para obtener la Capacidad de Carga Última ( $q_c$ ), para una zapata alargada:

$$q_c = cN_c + \gamma D_F N_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \quad (1)$$

Y para el caso de emplearse una zapata cuadrada, propone

$$q_c = 1.3cN_c + \gamma D_F N_q + 0.4\gamma B N_\gamma \quad (2)$$

Donde:

$q_u$ : capacidad de carga última del suelo.

$\gamma_1, \gamma_2$ : peso volumétrico del suelo bajo la zapata y sobre el nivel del desplante.

$c$ : cohesión.

$N_c, N_\gamma, N_q$ : factores de capacidad de carga.

$B$ : ancho de la zapata.

$D_F$ : profundidad de desplante.

siguientes ecuaciones:

$$Nq = \frac{e^{2\left(\frac{3\pi}{4} - \frac{\Phi}{2}\right) \tan(\Phi)}}{2 * c \cos^2\left(45 + \frac{\Phi}{2}\right)} \quad (3)$$

$$Nc = \frac{(Nq-1)}{\tan(\Phi)} \quad (4)$$

$$N_y = \frac{1}{2} \left( \frac{K_{py}}{\cos^2(\Phi)} - 1 \right) \tan(\Phi) \quad (5)$$

Donde  $K_{py}$ : coeficiente de empuje pasivo y representa por medio de la siguiente ecuación propuesta por Terzaghi (1943):

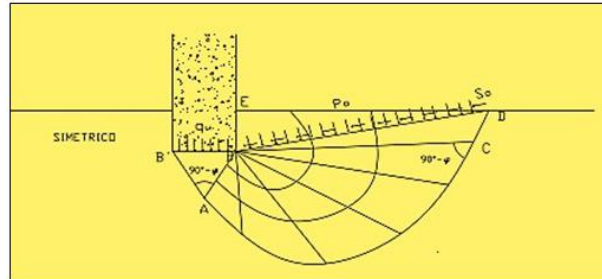
$$K_{py} = 3 \tan\left(45 + \frac{\Phi+33}{2}\right)^2 \quad (6)$$

### 2.3 Teoría de Meyerhof

En Meyerhof en su teoría de capacidad de carga toma en cuenta los esfuerzos cortantes desarrollados en el suelo arriba del nivel de desplante del cimiento, considerando un mecanismo de falla de la siguiente forma:

**Figura 2.**

*Mecanismo de falla de Meyerhof.*



El mecanismo de falla de una cimentación a poca profundidad está dividido en tres cuñas, la primera  $ABB'$  es una cuña de esfuerzos uniformes que se puede considerar en estado activo (Rankine); la segunda  $ABC$  es una cuña limitada por una curva de espiral logarítmica y es una zona de esfuerzo cortante radial; la tercera  $BCDE$  es una cuña que se considera en estado pasivo (Rankine). La línea  $BD$  es llamada Línea de Meyerhof y se considera que en esta superficie actúan los esfuerzos normales  $P_o$  y los tangenciales  $S_o$  productos de la cuña  $BDE$  (Teniente y Román, 2016, p. 43).

Por lo anterior, Meyerhof (1963), sugirió incorporar nuevos factores empíricos basados en resultados experimentales.

$$q_{ult} = c' N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} \quad (7)$$

#### 2.4 Criterio de rotura lineal de Mohr-Coulomb

El criterio de rotura de Mohr-Coulomb, introducido por primera vez por Coulomb en el año 1773, inicialmente pensado para el estudio en suelos, es un criterio de rotura lineal. Esto significa, tal y como se ha indicado anteriormente, que la ecuación que define la superficie de fluencia es una ecuación lineal. (...) Generalmente para el caso del criterio de Mohr-Coulomb, se define el criterio de rotura en función de la tensión tangencial y la tensión normal en un plano. En este caso la superficie de fluencia es de la forma  $\tau = f(\sigma)$ . La expresión matemática de dicha ecuación es:

$$\tau = c + \sigma n \tan\varphi \quad (8)$$

donde:

c: cohesión.

$\varphi$ : ángulo de fricción.

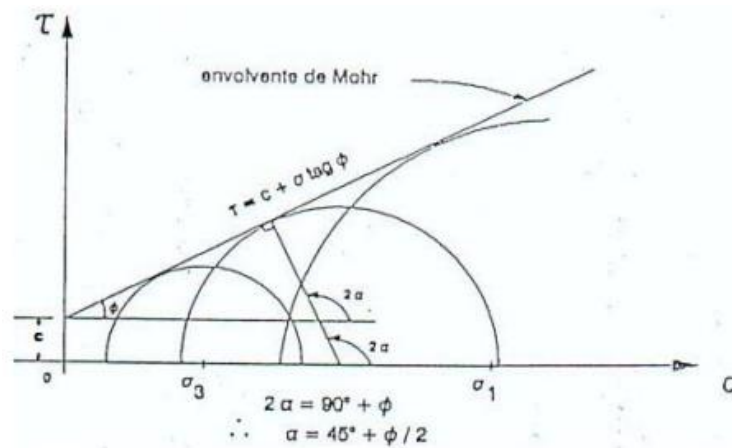
$\tau$ : es la tensión tangencial que actúa en el plano de rotura.

$\sigma n$ : es la tensión normal que actúa en el plano de rotura.

A continuación, se representa el criterio de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones normal y tangencial. Se puede apreciar que la ecuación de la superficie de rotura es la ecuación de la recta tangente a todos los círculos de falla (Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, s.f., p.18-19).

**Figura 3.**

Representación de la envolvente de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones normal y tangencial. Modificada de según Melentijevic, 2005.



### 3. Metodología

#### 3.1 Aspectos de diseño

Los aspectos de diseño que se tuvieron en cuenta para el análisis de capacidad portante en cimentaciones son los definidos a continuación.

### ***3.1.1 Profundidad de cimentación***

La profundidad de cimentación es la profundidad en la que la base de la cimentación entra en contacto con suelo resistente, al cual se transmiten las cargas de la superestructura.

De acuerdo con Das (2010), dentro de los aspectos importantes a la hora de definir la profundidad de la cimentación, se encuentran:

- Condiciones de funcionalidad (sótanos).
- Zona de cambios de volumen por humedecimiento y secado.
- Materiales orgánicos.
- Profundidad de socavación (ríos).

Para este proyecto se analizaron cimientos superficiales, sin profundidad de cimentación asociada, con el ánimo de simplificar el problema numérico para no simular el proceso de excavación. Además, se tuvo en cuenta las condiciones de humedad del suelo.

### ***3.1.2 Dimensiones del cimiento***

Al definir las dimensiones del cimiento se está definiendo la geometría que este va a tomar dependiendo de la funcionalidad para la cual se diseñe. Las principales geometrías de cimientos que se presentan son:

- Cimiento cuadrado ( $B = L$ )
- Cimiento rectangular ( $B < L$ )
- Cimiento circular ( $B = d$ )
- Cimiento corrido ( $L \gg B$ )

Donde (B) hace referencia a la base, (L) a la longitud y (d) al diámetro del cimiento. Para el desarrollo de este proyecto se analizaron cimientos corridos, es decir, que la longitud es mucho mayor que la base. Realizar el análisis con esta tipología de cimiento permite trabajar el problema de elementos finitos en 2D, y por tanto en condiciones planas de deformación en dirección del lado largo del cimiento, como se puede suponer para este tipo de cimientos.

### ***3.1.3 Parámetros geotécnicos***

Esta sección se refiere a “los parámetros físicos de los materiales, que constituyen en todo o en parte los parámetros necesarios para capturar el comportamiento geotécnico de un terreno. Estos parámetros reflejan las propiedades del terreno y tienen, para cada material particular, un valor constante” (Zuloaga, s.f., p. 2).

Adicionalmente, no deben ser modificados durante el cálculo, ni sus valores depender del tipo problema que se está solucionando, ya que deben caracterizar al terreno, en consecuencia, son constantes de cualquier ecuación matemática (Zuloaga, s.f.).

Tabla 1.

*Parámetros geotécnicos de suelo arenosos para análisis de capacidad portante.*

<b>Suelo tipo 1</b>	
Tipo de suelo	Arena bien gradada
Nivel freático	No presenta
Peso unitario ( $\gamma_t$ )	18 [KN/m <sup>3</sup> ]
Peso unitario saturado ( $\gamma_{sat}$ )	19 [KN/m <sup>3</sup> ]
Angulo de fricción ( $\phi$ )	30°
Modulo elástico (E)	20 [MPa]
Tipo de cimiento	corrido
Base de cimentación	1 [m]

Para los primeros análisis de comportamiento del suelo, se asume que el suelo de cimentación corresponde a una arena con buena gradación y con los parámetros elásticos y de resistencia mostrados en la Tabla 1. Se acoge un modelo de comportamiento del suelo lineal elástico con plasticidad perfecta tipo Mohr- Coulomb. Cabe aclarar que en este proyecto de investigación se realizaron los cálculos de capacidad portante a dos tipos de suelo (arena bien gradada y limo arenoso) a los cuales se les fueron realizando variaciones en sus parámetros geotécnicos con el fin de observar cambios en la capacidad portante.

### ***3.1.4 Capacidad portante***

En este proyecto se tuvo en cuenta el último criterio, es decir, se tomaron datos de la máxima carga que soportó el suelo por el contacto en superficie de un cimiento corrido.

**3.1.4.1 Cálculo de capacidad portante por método de Terzaghi.** Al ajustar la ecuación (1) a las condiciones de suelo en estudio, el primer y segundo término no se tienen en cuenta debido a que la cohesión es nula  $C' = 0$  al igual que la profundidad de desplante ( $D_f = 0$ ). Es decir, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$q_{ult} = \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \quad (9)$$

Con los datos suministrados en la Tabla 1, se calcula la capacidad portante última para la arena bien graduada de la siguiente forma:

Resolviendo ecuación (5) y (6) se obtuvieron valores de  $K_{p\gamma} = 52.05$  y  $N_\gamma = 19.75$

$$q_{ult} = \frac{1}{2}(18)(1)(19.75) = 177.75 \text{ kN/m}^2 \quad (10)$$

**3.1.4.2 Cálculo de capacidad portante por el método de Meyerhof.** Al igual que en el caso anterior (Terzaghi), se ignoran los dos primeros términos de la ecuación por las condiciones en la que se presenta el suelo de tipo arena. Los factores necesarios para la ecuación general propuesta por Meyerhof serían los siguientes:

$$N_y = (N_q - 1) \tan(1.4 * \phi) \quad (11)$$

$$N_y = (18.4 - 1) \tan(1.4(30)) = 15.67 \quad (12)$$

$$K_p = \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)^2 \quad (13)$$

$$K_p = \tan\left(45 + \frac{30}{2}\right)^2 = 3 \quad (14)$$

$$F_{ys} = 1 + 0.1K_p \frac{B}{L} \quad (15)$$

$$F_{ys} = 1 + 0.1(3) \frac{1}{10} = 1.03 \quad (16)$$

$$F_{yd} = 1 + 0.1\sqrt{K_p} \frac{D}{B} \quad (17)$$

$$F_{yd} = 1 + 0.1\sqrt{3} \frac{0}{1} = 1 \quad (18)$$

Terminado el cálculo de los nuevos factores, se procedió al cálculo de la capacidad portante por medio de la ecuación general (7) propuesta por Meyerhof.

$$q_{ult} = 145.16 \text{ kN/m}^2 \quad (19)$$

### **3.2 Aplicación del programa GEO5 para el cálculo de capacidad portante por Método de Elementos Finitos**

El Método de Elementos Finitos es una técnica numérica que ha sido utilizada, con éxito, desde hace más de tres décadas (Naylor, 1981), en la resolución de problemas de ingeniería geotécnica. Los programas de ordenador para el análisis geotécnico con el MEF han sido desarrollados específicamente para estudiar problemas que involucran: la interacción entre el terreno y las estructuras, la construcción de obras geotécnicas y sus diferentes etapas, problemas de filtración y estudios sobre las acciones dinámicas en el terreno (Zuloaga, s.f., p.1).

Para realizar los cálculos de capacidad portante por el método de elementos finitos, se buscó un software que brinda soluciones geotécnicas de gran alcance, el cual verificara estructuras específicas y fuera de gran trabajabilidad.

El software seleccionado fue GEO5, ya que “está diseñado para resolver diferentes problemas geotécnicos, desde los más básicos (verificación de cimentaciones, muros, estabilidad de taludes), hasta programas altamente especializados (análisis de los túneles, daños debido a la construcción de un túnel, estabilidad de roca)” (GEO5 Software Geotécnico, 2020a). Cada programa que maneja GEO5 resuelve un tipo definido de estructura, por lo que se puede adquirir

sólo aquellos que se necesitan, que para este proyecto se hizo la descarga del software que maneja MEF (GEO5 Software Geotécnico, 2020b). Sus características básicas incluyen:

- Introducción simple de datos de geometría y etapas de construcción.
- Generación automática de la malla y condiciones de frontera.
- Modelización de elementos en contacto con el terreno mediante elementos “barra y viga” (anclajes y estructuras).
- Varios modelos constitutivos (Elástico, Drucker-Prager, Mohr-Coulomb, tipo Cam-Clay (elastoplástico e hiperbólico).
- Corrector automático de topología.
- Base de datos para los parámetros de suelos y rocas.
- Número arbitrario de cargas puntuales y distribuidas (rectangulares, trapezoidales) en cualquier combinación.
- Número arbitrario de anclajes, vigas, arriostramientos, refuerzos con geotextiles e interfaces.
- Modelización de la presencia de agua mediante isolíneas de presiones de poros o niveles freáticos.
- Posibilidad de estudiar las diversas etapas de construcción en un solo análisis.
- Algoritmo de reducción de  $c$  y  $\phi$  para determinar factores de seguridad.

Con base en lo anterior, se realizó un barrido de toda la interfaz que maneja el programa GEO5, con el fin de entender cómo trabaja el programa y así realizar un ingreso de datos de manera apropiada en el modelo de MEF.

Luego de inspeccionar el programa de GEO5 para el cálculo por el MEF, se realizaron tres fases consecutivas que en resumen son la secuencia que se debe llevar a cabo dentro del programa para la obtención de datos de capacidad portante. Dichas fases se mencionan con más detalle a continuación.

### ***3.2.1 Fase 1: Modelamiento topológico***

En esta fase se diseñó la geometría de la zona de estudio, es decir, se asignaron dimensiones de ancho y profundidad al perfil de suelo, por lo cual, se realizaron variaciones en estas longitudes tanto para suelos homogéneos como suelos estratificados.

Para este proyecto, se plantearon 16 perfiles de suelo, esto con el fin de observar si existe una influencia de la geometría en los resultados de dicha capacidad portante.

Las dimensiones que se trabajaron para los suelos homogéneos se analizaron con variación en ancho y profundidad, mientras que las dimensiones para los suelos estratificados se establecieron con un ancho estándar, pero con variaciones en la profundidad de cada una de las capas presentes.

A continuación, se presentan las tablas donde se establece la geometría para los tipos de suelo analizados.

Tabla 2.

*Geometría de perfiles de suelo tipo A utilizados en el software.*

<b>Perfiles de suelos homogéneos tipo A</b>		
<b>Perfil</b>	<b>Ancho [m]</b>	<b>profundidad [m]</b>
tipo 1	20	40
tipo 2	40	40
tipo 3	60	40
tipo 4	100	40
tipo 5	200	40

Tabla 3.

*Geometría de perfiles de suelo tipo B utilizados en el software.*

<b>Perfiles de suelos homogéneos tipo B</b>		
<b>Perfil</b>	<b>Ancho [m]</b>	<b>profundidad [m]</b>
<b>tipo 6</b>	20	80
<b>tipo 7</b>	40	80
<b>tipo 8</b>	60	80
<b>tipo 9</b>	100	80
<b>tipo 10</b>	200	80

Por otra parte, para realizar los análisis de suelos estratificados, se realizaron dos capas de suelo, cada una de ellas con suelo de diferente resistencia mecánica. La primera capa aumentaba en profundidad, en un intervalo de 0.5 metros y la segunda capa evidenciaba la situación inversa, es decir, esta disminuía en un intervalo de 0.5 metros, para una profundidad de suelo total de 40 metros.

En este análisis de suelos estratificados se mantuvo siempre constante el ancho del perfil de suelo, con un valor establecido de 100 metros.

A continuación, se presenta la tabla de los tipos de perfiles de suelo estratificados que se trabajaron.

Tabla 4.

*Geometría de perfiles de suelos estratificados utilizados en el software.*

<b>Perfiles de suelos estratificados. Ancho = 100 [m]</b>		
<b>Perfil</b>	<b>profundidad estrato superior [m]</b>	<b>profundidad estrato Inferior [m]</b>
<b>Tipo11</b>	0,5	39,5
<b>Tipo12</b>	1	39
<b>Tipo13</b>	1,5	38,5
<b>Tipo14</b>	2	38
<b>Tipo15</b>	2,5	37,5
<b>Tipo16</b>	3	37
<b>Tipo17</b>	3,5	36,5

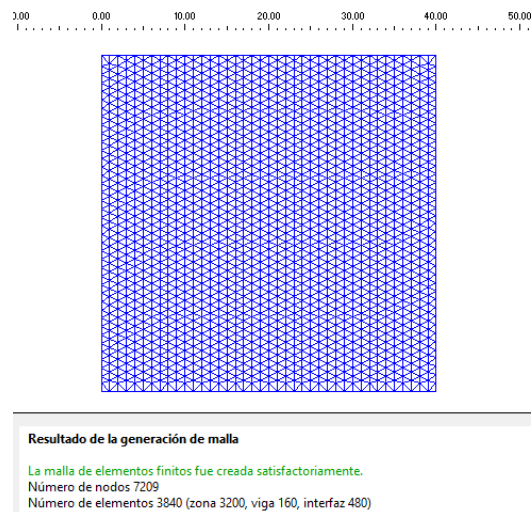
Con base en los tipos de geometría planteados, el programa desarrolló la respectiva malla de elementos finitos para cada uno de ellos como se muestra en la figura 4, según la geometría asignada al suelo, es decir a mayor longitud de base y profundidad, mayor serán el número de nodos y elementos generados por el programa.

La malla de elementos finitos que se presenta en la figura 4, busca realizar subdivisiones del perfil de suelo, haciendo que un problema complejo de variables desconocidas se reduzca a variables más simples. De estas subdivisiones se generan nodos, que, para el caso de la figura

planteada, se obtuvieron 7209, los cuales unen las diferentes figuras que se forman en la malla; en el caso del software GEO5, se evidencia que son figuras de tipo triangular.

#### Figura 4.

*Modelo de malla de elementos finitos para perfil de suelo tipo 2.*



Adicionalmente, en esta fase se añadieron las condiciones mecánicas en las que se encuentra el perfil de suelo, es decir, si es un suelo homogéneo, estratificado, nivel freático, densidad, entre otros.

#### 3.2.2 Fase 2: Modelo de análisis de suelo por gravedad

Luego de asignar las propiedades mecánicas del suelo al software, se realizó un primer modelo de suelo sin carga externa como se visualiza en la figura 5, en donde la fuerza de gravedad es la que actúa.

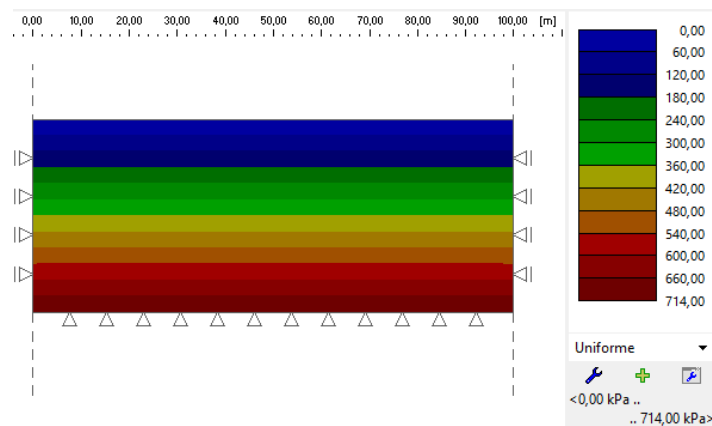
Esto se llevó a cabo, con la idea de que dicho suelo no ha recibido ninguna carga en la superficie tiempo atrás. Se requiere fundamentalmente para establecer el estado de esfuerzos geostáticos del terreno antes de aplicar cualquier carga estructural en la superficie.

Este procedimiento se realizó en todos los perfiles de suelo de las tablas 2, 3 y 4, pero se toma como modelo en la figura 5 el perfil de suelo tipo 4, ya que los demás perfiles al presentar los mismos parámetros geotécnicos de suelo también van a presentar los mismos esfuerzos efectivos sin carga externa.

Para realizar este modelo en condiciones naturales, el programa tiene una herramienta llamada “etapa”, que se utiliza para realizar simulaciones de distintos tipos de carga a un mismo suelo en estudio, es decir, si se requiere cambiar las condiciones de carga, se debe asignar una nueva etapa al software, adicionalmente, este puede realizar comparaciones del tipo de comportamiento que presente el suelo con las cargas aplicadas entre etapas.

### Figura 5.

*Esfuerzos efectivos  $\sigma_z$  del suelo sin carga externa, solo actúa fuerzas gravitatorias.*



### *3.2.3 Fase 3: Análisis de suelo con aplicación de carga superficial*

En esta fase se ejecutaron todos los análisis de carga para cada uno de los perfiles de suelo con las condiciones mecánicas preestablecidas. Es por esto, que se desarrollaron varios tipos de análisis los cuales permitieron estudiar la influencia de los aspectos geométricos en los resultados de capacidad portante; adicionalmente, se estudió la influencia de la rigidez del suelo en los modos de falla de este y finalmente se analizó la sensibilidad de los parámetros de resistencia del suelo en la magnitud de la capacidad portante última de suelo.

Para ello se realizó una búsqueda iterativa de capacidad portante que fuera soportada por el perfil de suelo, por lo cual, se iba aumentando dicha carga aplicada en superficie hasta que el software GEO5 (MEF) presentara un recuadro que indicaba la imposibilidad de convergencia del programa para lograr el equilibrio de fuerzas y la compatibilidad de esfuerzos y deformaciones.

Para cada uno de los 16 perfiles se efectuó el análisis de capacidad portante que soportaba cada uno de ellos con las condiciones de suelo asignadas.

### **3.3 Cálculo de sensibilidad del software GEO5**

En esta fase se utilizaron los cálculos de capacidad portante última obtenidos por el método de las ecuaciones clásicas, que, para el caso de la arena, se tomó el valor más crítico en aras de realizar el análisis inicial. Dicho valor fue el obtenido por el método de Meyerhof, el cual, arrojó como resultado un  $q_u = 145.16 \frac{KN}{m^2}$ .

La capacidad portante última obtenida por el método de Meyerhof se ingresó al software GEO5 y fue aplicada en la superficie de los perfiles de suelo Tipo A y Tipo B. Paso seguido, se hizo una reducción del 50% a dicha carga y poco a poco se fue incrementando hasta alcanzar su valor máximo de 100%.

Durante este proceso de incremento de esfuerzo, se analizaron los desplazamientos que se generaban en los perfiles de suelo frente a este evento de incremento de carga superficial y así determinar si las dimensiones de las interfaces hacen que surjan variaciones en los desplazamientos producidos por una carga.

El procedimiento planteado en los párrafos anteriores se realizó también para los dos resultados de capacidad portante restantes.

## **4. Análisis de resultados**

### **4.1 Resultados de la capacidad portante en suelos homogéneos**

Este fue uno de los puntos más importante de esta investigación, ya que permitió establecer como primera medida, una idea del comportamiento en los resultados de las teorías clásicas y el software, dando a conocer similitudes o diferencias entre éstos. Para el caso base, de un suelo homogéneo, arenoso, seco, con las propiedades elásticas y de resistencia presentadas en la Tabla

1, se realizó una estimación de la capacidad portante con el software. Dando como resultado un valor de esfuerzo máximo resistente antes de perder convergencia de 219 KPa. En la Tabla 5, se comparan las tres magnitudes de la capacidad portante última obtenida por Meyerhof, Terzaghi y el software. Como se puede observar, ambos métodos clásicos están del lado de seguro por ofrecer valores de capacidad menores a los obtenidos por el método de los elementos finitos.

Tabla 5.

*Valores de capacidad portante para arena bien gradada a partir de los parámetros elásticos y de resistencia del caso base (Tabla 1).*

Método	Capacidad portante KN/m <sup>2</sup>
Meyerhof	145
Terzaghi	177
GEO5	219

#### 4.2 Análisis de resultados de sensibilidad en la interfaz del software

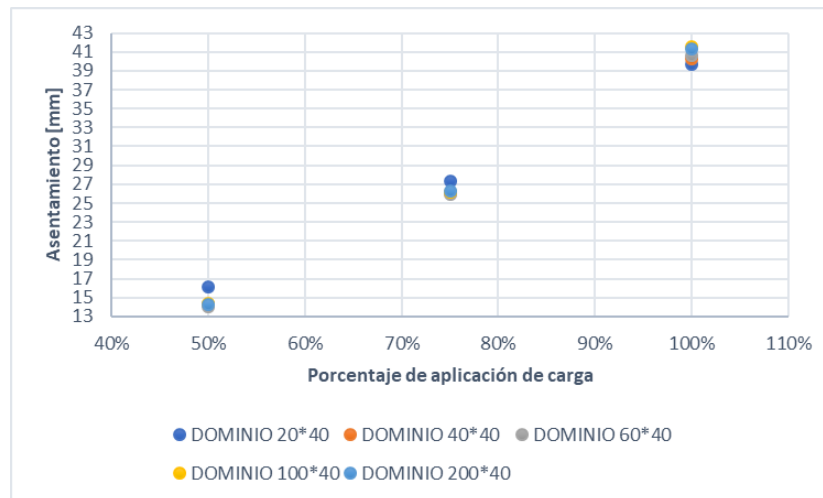
En un segundo análisis se evaluó la evolución de los asentamientos inmediatos, para los tres niveles de capacidad portante última calculados en el análisis previo. Las Tablas 6, 7 y 8 resumen estos resultados para la capacidad de carga de Meyerhof, Terzaghi y el Software respectivamente. En todos los casos, se determinaron los asentamientos inmediatos para un 50% del nivel de carga última, es decir como si se aplicara un factor de seguridad  $F.S. = 2.0$ , luego un 75%, representando un  $F.S. = 1.33$  y sin tener en cuenta factor de seguridad alguno, es decir para el 100% de la carga. Adicionalmente, este análisis se realizó para diferentes tamaños de dominio,

con el objetivo de investigar posibles dependencias de los resultados a partir de la geometría del problema. Los resultados se pueden observar en las Gráficas 1, 2 y 3.

Tabla 6.

*Valores de asentamientos inmediatos obtenidos por el método de Meyerhof en perfiles homogéneos Tipo A.*

Capacidad portante Meyerhof					
% Carga	Asentamientos inmediatos [mm]				
	Interfaz 20*40	Interfaz 40*40	Interfaz 60*40	Interfaz 100*40	Interfaz 200*40
50 %	16.1	14.3	14.1	14.4	14.3
75 %	27.3	26.1	25.9	26.2	26.3
100 %	39.7	40.3	40.6	41.6	41.3

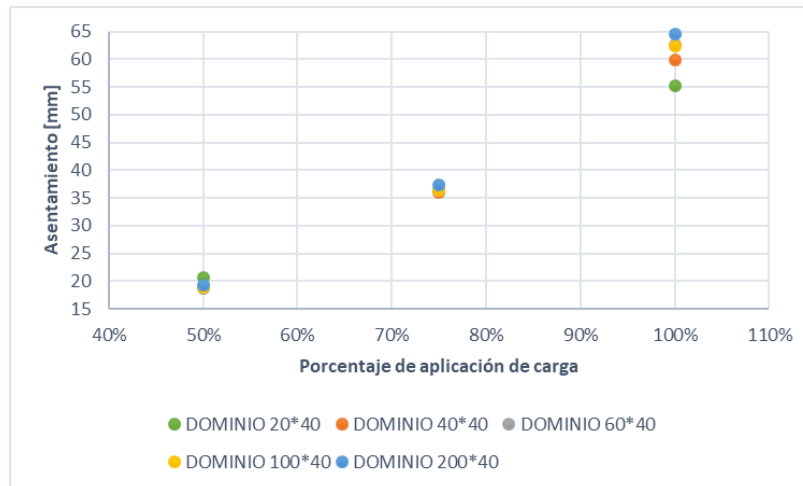


Gráfica 1 . Asentamientos inmediatos generados aplicando capacidad portante última de Meyerhof (145 KN/m<sup>2</sup>).

Tabla 7.

Valores de asentamientos inmediatos obtenidos por el método de Terzaghi en perfiles homogéneos Tipo A.

Capacidad portante Terzaghi					
% Carga	Asentamientos inmediatos [mm]				
	interfaz 20*40	interfaz 40*40	interfaz 60*40	interfaz 100*40	interfaz 200*40
50 %	20.7	19	18.8	18.9	19.3
75 %	36.3	35.9	36.4	36.4	37.3
100 %	55.3	59.9	62.6	62.5	64.5

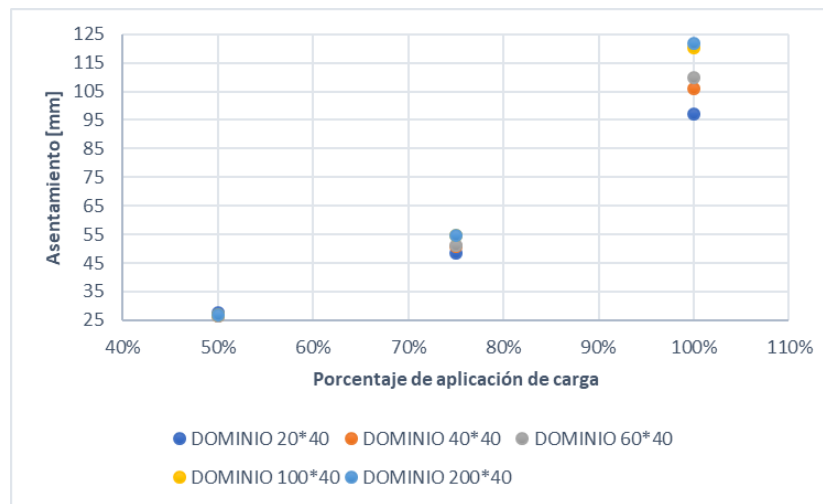


Gráfica 2. Asentamientos inmediatos generados aplicando capacidad portante última de Terzaghi (177 KN/m<sup>2</sup>).

Tabla 8.

Valores de asentamientos inmediatos obtenidos por el método de elementos finitos GEO5 en perfiles homogéneos tipo A.

Capacidad portante software					
% Carga	Asentamientos inmediatos [mm]				
	Interfaz 20*40	Interfaz 40*40	Interfaz 60*40	Interfaz 100*40	Interfaz 200*40
50 %	27.8	26.3	26.3	26.7	26.7
75 %	48.3	50.8	51.3	54.8	54.8
100 %	97.2	105.8	109.8	120.1	121.7



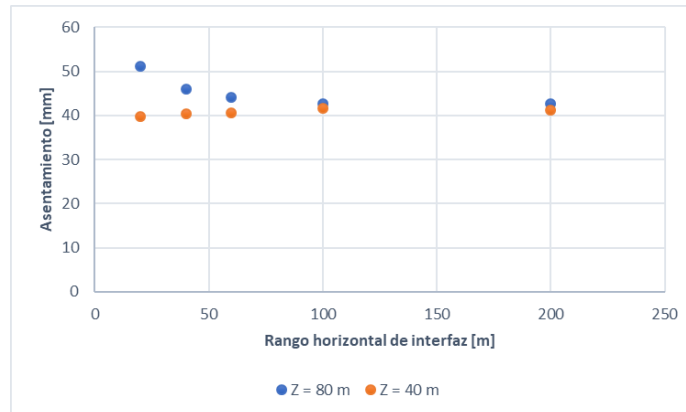
Gráfica 3. Asentamientos inmediatos generados aplicando capacidad portante última de GEO5 (219 KN/m<sup>2</sup>).

El procedimiento anterior también se aplicó usando los mismos valores de capacidad portante propuestos en la Tabla 5 para los perfiles de suelo homogéneo Tipo B.

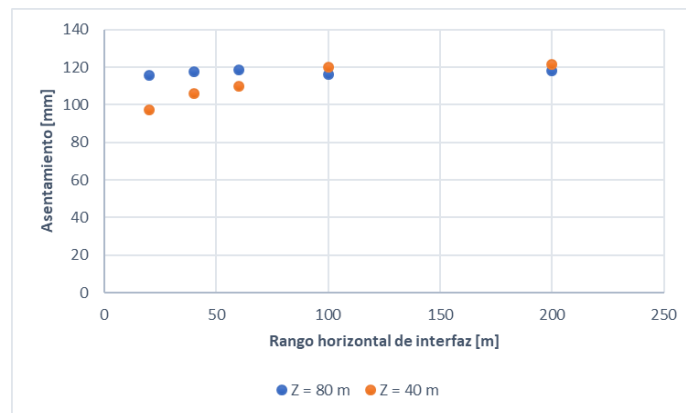
Finalmente se pudo observar la similitud en los asentamientos inmediatos para la reducción de la carga sin importar el tamaño del dominio analizado (Gráficas 1, 2 y 3). Adicionalmente, para este caso base, los resultados sugieren que aplicar factores de seguridad de capacidad portante  $F.S. > 2.0$ , es decir donde la carga admisible sea al menos un 50% menor que la capacidad última, involucra valores de asentamientos cercanos al valor máximo de “25.4 mm” (Alva, s.f., p. 120). Por tanto, es adecuado que los factores de seguridad de capacidad portante sean  $F.S. > 2.0$  ya que de esta manera no solo se asegura un buen comportamiento del suelo, sino que además se estaría considerando unos niveles de asentamientos aceptables. Mientras que, para la aplicación del total de la carga, los valores de asentamientos parecen tener una influencia del tamaño del dominio. Esto es evidente en las Gráficas 2 y 3.

Al terminar el análisis para los perfiles mencionados anteriormente, se analizaron los resultados de sensibilidad del software para tener la capacidad de identificar la influencia del tamaño del dominio en los resultados de capacidad portante.

Para ello, se presentan aquí dos gráficas que permiten analizar los resultados del comportamiento de los asentamientos máximos generados por los perfiles tipo A(naranja) y tipo B(azul), aplicando una misma carga, bien sea de Meyerhof o del software.



Gráfica 4. Asentamientos inmediatos generados por el método de Meyerhof en los perfiles homogéneos Tipo A y Tipo B.



Gráfica 5. Asentamientos inmediatos generados por el MEF en los perfiles homogéneos Tipo A y Tipo B.

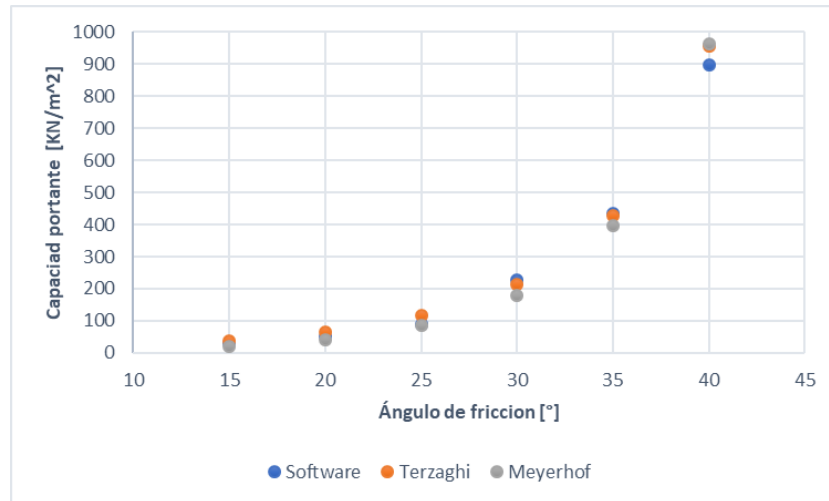
Los resultados del análisis de sensibilidad del tamaño del dominio para la capacidad portante última sugieren que las mayores variaciones de los resultados de asentamientos inmediatos se obtienen para dominios pequeños; por ejemplo, con longitudes menores a 60 metros. En ambos casos, no se evidencian sensibilidades importantes para dominios con longitudes superiores a

100 metros. Adicionalmente, los resultados sugieren que, si la longitud del dominio es de al menos 100 metros, no existe una influencia importante del espesor o profundidad del dominio. Por tanto, el dominio de análisis definitivo para los análisis posteriores es 100 x 40 metros.

A continuación, se presenta el análisis comparativo de los resultados obtenidos a través de la aplicación de ecuaciones clásicas de Terzaghi y Meyerhof por medio de GEO5 para cada una de las variaciones en los parámetros correspondientes de un suelo homogéneo y estratificado. Adicionalmente, se tiene en cuenta la saturación del suelo para la mayoría de los ensayos con el fin de abarcar un campo de estudio mayor.

#### **4.3 Resultados de la influencia del ángulo de fricción para cálculo de capacidad portante**

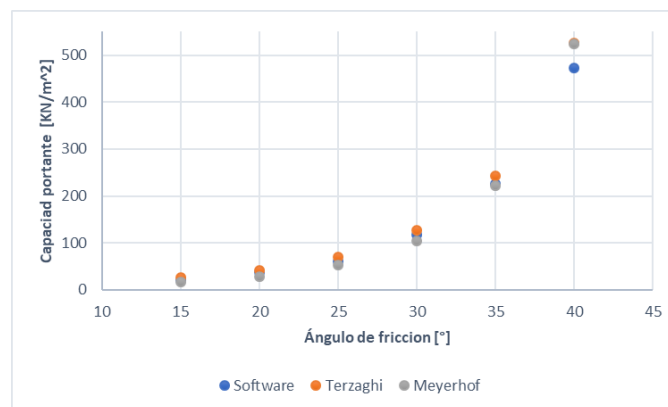
El ángulo de fricción es uno de los parámetros a tener en cuenta para el análisis de cualquier tipo de suelo, conocer su incidencia frente al cálculo de la capacidad portante fue de suma importancia. Luego de llevar a cabo un análisis donde se realizaron variaciones en el ángulo de fricción de la arena, asignando valores en un rango de 15 a 40 grados, en intervalos de incremento de 5 grados como se evidencia en la figura 8, se presentan los resultados obtenidos de capacidad portante.



Gráfica 6. Comportamiento de la capacidad portante según ángulo de fricción en un suelo seco.

Dadas las características mencionadas en la tabla 1, con variaciones en el ángulo de fricción, genera una mayor capacidad portante a medida que este último aumenta, dando como resultado una curva creciente no lineal. Nótese que el valor de la carga no aumenta considerablemente con ángulo de fricción inferiores a 25°, en cambio, valores iguales o mayores si presenta un aumento importante.

Para el caso de una arena saturada, se obtuvo.



Gráfica 7. Comportamiento de capacidad portante según ángulo de fricción en un suelo saturado.

Como se puede evidenciar, existe un comportamiento similar de crecimiento a los de la arena seca, pero a diferencia de esta, la arena saturada, por el alto contenido de agua, si presenta una reducción de capacidad portante significativa ya que los métodos propuestos por las teorías clásicas y el software trabajan esfuerzos efectivos y, por ende, con el peso unitario efectivo del suelo, por lo cual, el peso unitario saturado sufre una reducción producida por el peso unitario del agua.

Por otra parte, se comparan los resultados de las ecuaciones clásicas con los del MEF para las variaciones de ángulos de fricción y se evidencia que son muy similares a los obtenidos por las ecuaciones clásicas excepto para ángulos de fricción muy altos, donde las ecuaciones sobre predicen los valores de capacidad en comparación con del software.

#### **4.4 Resultados de variaciones en el peso unitario para el cálculo de capacidad portante**

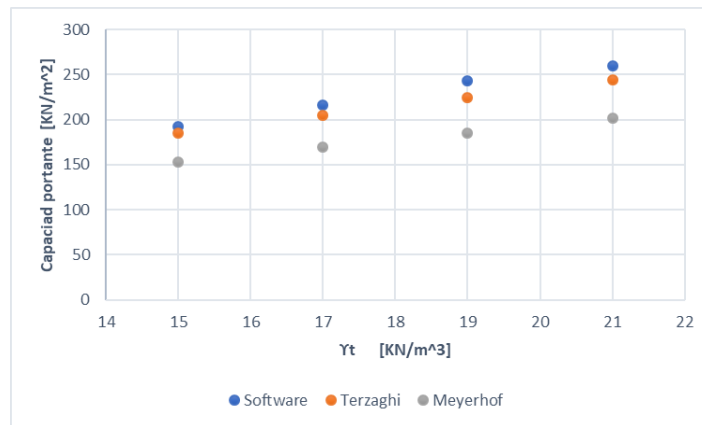
El peso unitario del suelo (peso por unidad de volumen) presenta gran importancia en la identificación de un suelo y depende mucho de la presencia de agua, por lo cual los valores no son los mismos para un suelo seco que para un suelo saturado. Para determinar su influencia en los resultados de capacidad portante, se analizaron los pesos unitarios mostrados en la Tabla 9 para las ecuaciones clásicas y el MEF.

Tabla 9.

Análisis para suelo tipo 1 con variaciones de peso unitario.

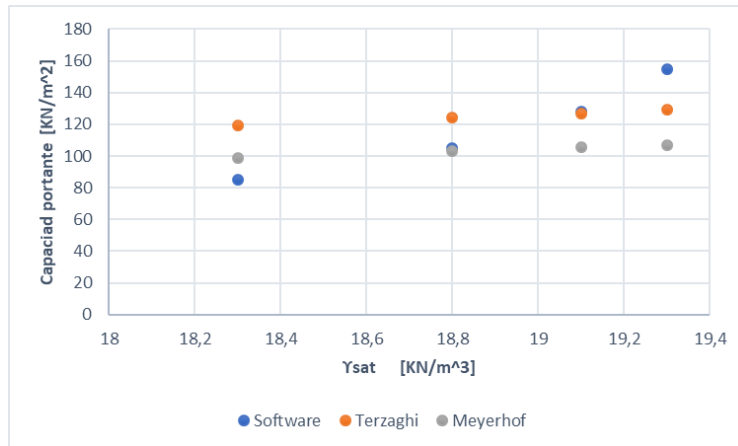
Suelo Tipo 1			
Perfil de suelo	Tipo de análisis	peso unitario $\gamma_t$ [KN/m <sup>3</sup> ]	peso unitario $\gamma_{sat}$ [KN/m <sup>3</sup> ]
tipo 4 (100x40) [m]	Tipo 1	15	18,3
	Tipo 2	17	18,8
	Tipo 3	19	19,1
	Tipo 4	21	19,3

Con base en los análisis planteados en la tabla 9 se plasmaron los resultados en la Gráfica 8:



Gráfica 8. Comportamiento de la capacidad portante según peso unitario ( $\gamma_t$ ).

Los resultados obtenidos por el MEF fueron superiores frente a los resultados de las teorías clásicas en cada uno de los casos, además, el comportamiento de la capacidad portante fue aumentando a medida que se incrementó el valor de peso unitario del suelo.

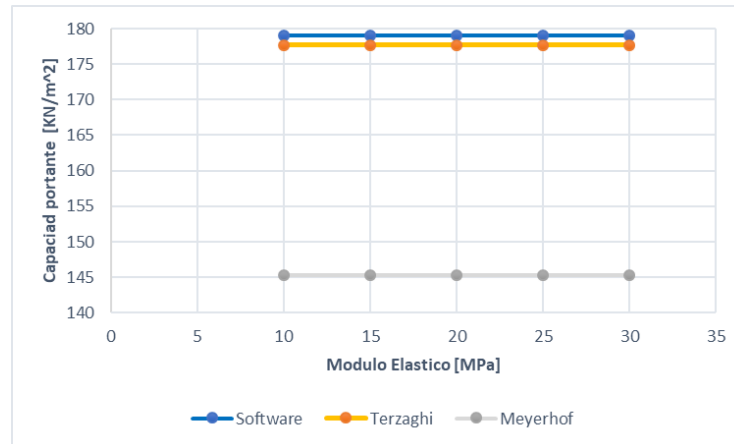


Gráfica 9. Comportamiento de la capacidad portante según peso unitario en condición de saturación ( $Y_{sat}$ ).

Para el caso en que se cuenta con presencia de agua en el suelo, se observó que no se mantienen las relaciones de proporcionalidad establecidas en los resultados gráficos del suelo seco. Como se podría esperar, este parámetro presenta una menor influencia en los resultados de capacidad portante última que el ángulo de fricción.

#### 4.5 Resultados de variaciones en el módulo elástico para el cálculo de capacidad portante

Se parte de la idea de que el módulo de elasticidad puede aumentar o disminuir la rigidez de un suelo, con base en esto, se analizó si dicho modulo afectaba el comportamiento de la capacidad portante por el MEF. Para ello se realizaron ensayos variando el valor del módulo de elasticidad en el rango de 10MPa hasta 30MPa en intervalos de 5 MPa.



Gráfica 10. Comportamiento de la capacidad portante según el módulo elástico en un suelo seco.

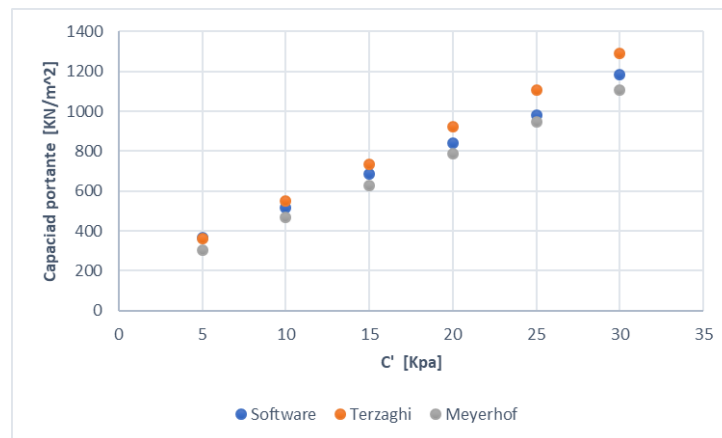
Analizando los resultados de la Gráfica 10, se deduce que el módulo de elasticidad no afecta en nada a la capacidad portante de un suelo, puesto que, en las ecuaciones clásicas, teniendo en cuenta los parámetros de estudio, no se emplea en ningún cálculo el valor del módulo de elasticidad. Lo anterior, fundamentalmente se puede explicar porque el modelo de rotura utilizado no permite tener en cuenta la no linealidad del comportamiento del suelo. Es decir, el modelo Mohr-Coulomb, no permite que se presenten deformaciones plásticas antes de la rotura, esto genera entonces que no se puedan capturar características como la acumulación de las deformaciones plásticas antes de la falla. Por tanto, para caracterizar este efecto, es necesario utilizar un modelo de comportamiento del suelo no lineal, tipo de endurecimiento por deformación (Hardening Soil Model).

La presencia de agua en el suelo disminuye la carga que pueda soportar el suelo, como se analizó anteriormente, y en estas condiciones tampoco parece afectar el módulo elástico en los resultados. La única diferencia para resaltar es que el valor de capacidad portante obtenido por el

MEF está entre los dos resultados de los métodos clásicos, incluso, muy parecidos a los resultados de la ecuación de Terzaghi.

#### 4.6 Resultados de variaciones en la cohesión para el cálculo de capacidad portante

Por definición se sabe que la cohesión es la fuerza que permite a las partículas estar unidas entre sí, por esto, se presume que es de mucha importancia para definir qué tan resistente es el suelo. Sin embargo, la única manera de saber con exactitud sobre la afectación de este parámetro es realizando un análisis, variando el valor de la cohesión desde 5 KPa hasta un máximo de 30 KPa en intervalos de 5 KPa.



Gráfica 11. Comportamiento de la capacidad portante según la cohesión en arena seca.

Es muy clara la relación directamente proporcional entre la cohesión y el resultado de la capacidad de carga, también se puede observar esta relación mediante el análisis de las

ecuaciones de los métodos clásicos, donde la cohesión representa un factor de influencia muy importante y el software presenta la misma consistencia en los resultados.

La relación se mantiene cuando el suelo en estudio cuenta con la presencia de agua.

Es importante notar que sistemáticamente, en el caso de suelos con fricción y cohesión, el cálculo de Terzaghi, sobre predice la capacidad del suelo. Por tanto, estos resultados sugieren, que esta ecuación debe desestimarse para este tipo de materiales que van a ser analizados.

#### 4.7 Capacidad portante para suelo limo arenoso (Terzaghi, Meyerhof y GEO5)

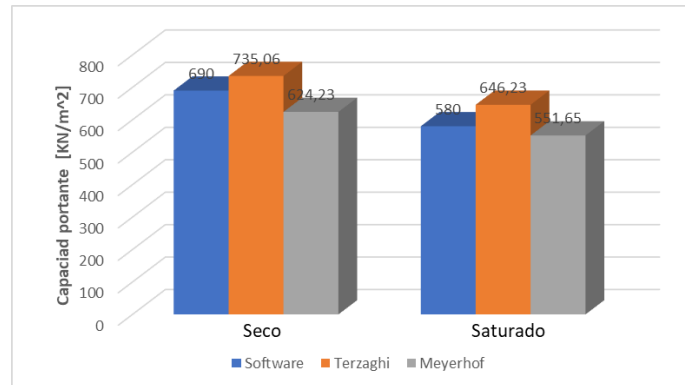
El estudio de este tipo de suelo es muy importante ya que al igual que la arena es muy común en la práctica, es por esto, que se decide incluir en esta investigación, asignando las siguientes características:

Tabla 10.

*Parámetros de suelo limo arenoso para el cálculo de capacidad portante.*

Suelo limo arenoso	
<b>Cohesión</b>	15 [KPa]
$\gamma_t$	18 [KN/m <sup>3</sup> ]
$\gamma_{sat}$	19 [KN/m <sup>3</sup> ]
$\phi$	30°
<b>Interfaz</b>	100*40 [m]

El análisis se realizó mediante los tres métodos que se han venido trabajando, con el fin de determinar qué tan aproximado es el programa en cuestión frente a las teorías clásicas. Esto se ejecutó tanto para suelo seco como para saturado y los resultados se presentan a continuación.



Gráfica 12. Capacidad portante en suelo limo arenoso seco y en condiciones de saturación.

El resultado obtenido a través de GEO 5 se mantuvo intermedio a los valores obtenidos por métodos clásicos, siendo mayor que Meyerhof, pero menor que el de Terzaghi, sugiriendo que el análisis más conservador y del lado seguro es el de Meyerhof. Terzaghi en estos casos parece sobre predecir los valores de capacidad.

#### 4.8 Análisis de resultados de capacidad portante en suelos estratificados por el método de elementos finitos (MEF).

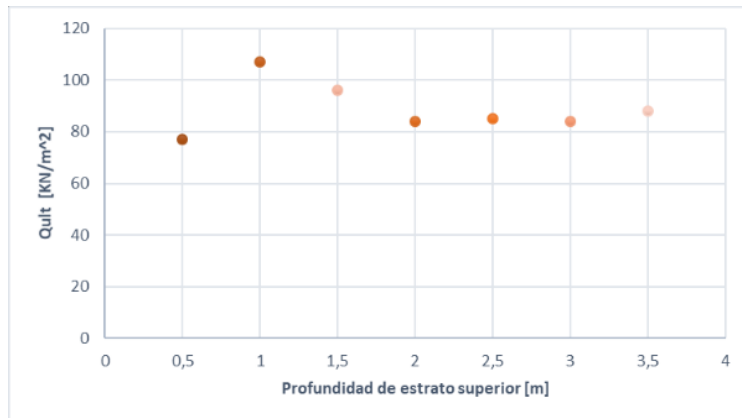
El análisis para la capacidad de carga presentado en las secciones anteriores implica casos en que el suelo que soporta la cimentación es homogéneo y se extiende hasta una profundidad considerable. La cohesión, el ángulo de fricción y el peso específico del suelo fueron supuestos

constantes en el análisis de la capacidad de carga. Sin embargo, en la práctica se encuentra perfiles de suelos estratificados. En tales casos, la superficie de falla bajo carga última puede extenderse a través de dos o más estratos. La determinación de la capacidad de carga última en suelos estratificados se hace solo en número limitado de casos (Das, 2012, p.190).

Esta investigación tiene como objetivo el estudio del comportamiento de un suelo estratificado frente a la aplicación de cargas, además, evidenciar la importancia del orden de los estratos. Para ello se realizan los respectivos análisis teniendo los dos tipos de suelos con los que se ha venido trabajando y con algunas variaciones en sus parámetros. La profundidad de los estratos se fue variando desde 0.5 metros hasta 3 o 3.5 metros en los casos que se consideró necesario. Por lo anterior, se realizó un análisis detallado para cuatro tipos de perfiles estratificados.

#### ***4.8.1 Perfil tipo 1***

El primer estudio realizado se encaminó a las condiciones de un suelo con estrato superior una arena bien gradada y estrato inferior correspondiente al suelo limo arenoso.

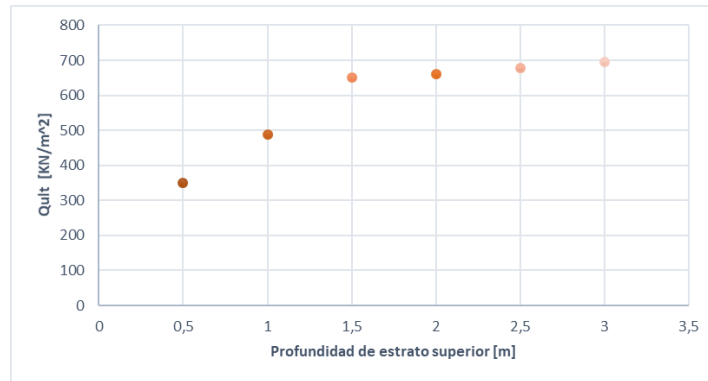


*Gráfica 13.* Capacidad portante última para un suelo estratificado (arena estrato superior  $E=20$  MPa y limo arenoso estrato inferior  $E=20$  MPa).

Los resultados no atienden un solo patrón, ya que para los dos primeros casos parece aumentar, pero luego desciende hasta el punto de buscar estabilizarse. Por todo esto es muy difícil decir algo concreto frente a este análisis, solo que al tratarse de un suelo de este estilo debe tenerse precaución si el estrato superior es poco profundo.

#### **4.8.2 Perfil tipo 2.**

Este tipo de suelo estratificado hace referencia a que los estratos fueron invertidos, es decir, el estrato superior es el suelo limo arenoso y el segundo estrato es la arena bien graduada.

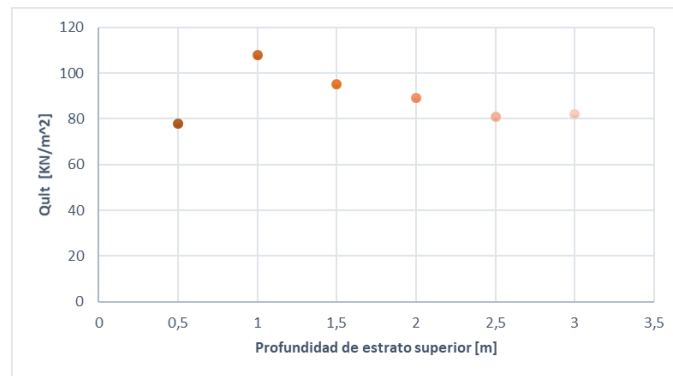


*Gráfica 14.* Capacidad portante última para un suelo estratificado (limo arenoso estrato superior  $E=20$  MPa y arena estrato inferior  $E=20$  MPa).

A diferencia del suelo estratificado anterior, se puede deducir un comportamiento de los resultados. Hasta una profundidad de 1.5 metros se evidencia que esta influye en la capacidad de soporte del suelo, a diferencia de lo que ocurre más adelante, dado que los valores son muy parecidos, dando a entender que a mayor profundidad de estrato interferirá menos en la capacidad.

#### **4.8.3 Perfil tipo 3**

Este tipo de suelo obedece al orden del suelo tipo 1, la diferencia es la variación en uno de los parámetros del suelo limo arenoso. Se aumento el módulo de elasticidad hasta un valor de 40 MPa.

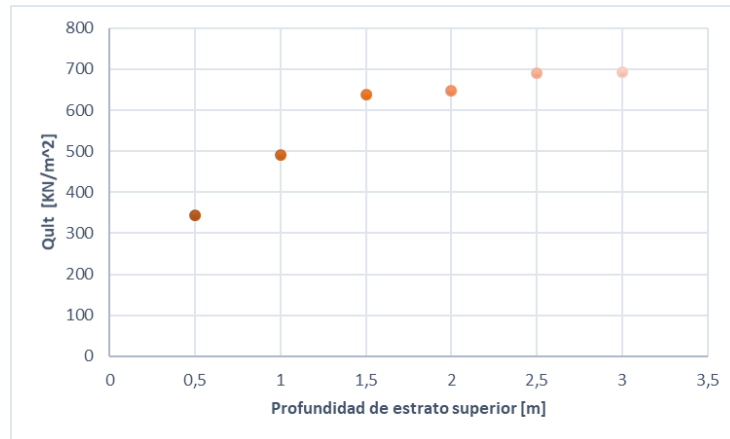


*Gráfica 15.* Capacidad portante última para un suelo estratificado (arena estrato superior  $E=20$  MPa y limo arenoso inferior  $E=40$  MPa).

El comportamiento de los resultados es exactamente igual a los de suelo tipo 1, dejando claro una vez más que el módulo de elasticidad no tiene incidencia en la capacidad de carga de un suelo. Esto se observó no solo en el patrón de los resultados, sino en los valores muy similares.

#### ***4.8.4 Perfil tipo 4***

El orden de los estratos es similar al utilizado en el suelo tipo 2, la diferencia es el aumento del módulo de elasticidad del suelo limo arenoso, tal cual como en el caso anterior.



Gráfica 16. Capacidad de carga para un suelo estratificado (limo arenoso estrato superior  $E=20$  MPa y arena inferior  $E=40$  MPa).

La influencia se presenta hasta el mismo punto que el suelo tipo 2, por lo que se asegura que el cambio en este parámetro no ofrece ninguna diferencia en los resultados de capacidad portante.

## 5. Conclusiones

Se puede concluir que el programa GEO5 en su extensión de método de elementos finitos (MEF), siendo analizado con el modelo de Mohr-Coulomb, se encuentra muy bien estructurado para el cálculo de capacidad portante en suelos homogéneos y estratificados, presentando resultados congruentes comparados con los obtenidos por los métodos de las ecuaciones clásicas.

Como se pudo observar en los análisis gráficos, el programa tiende a presentar sus resultados en un equilibrio o muy similares a los planteados por las ecuaciones de Terzaghi y Meyerhof, en consecuencia, esto genera seguridad al usuario que requiera hacer uso del software para realizar análisis geotécnicos por el método de elementos finitos de GEO5.

Se puede afirmar que una de las mayores ventajas que presenta el programa GEO5 es que cuenta con funciones que permiten diseñar con mayor precisión el perfil de suelo en estudio, esto es un gran avance frente a las ecuaciones clásicas, ya que, al permitir un diseño con mayor precisión, ofrece una idea más exacta de las condiciones en las que se encuentra dicho suelo en campo. Adicionalmente, otorga mejores resultados de capacidad portante. Lo anterior se pudo corroborar en la sección donde se realizó el estudio de sensibilidad geométrica del software, lo cual evidenció que los resultados obtenidos por el método de elementos finitos variaban de cierta medida al realizar cambios en el dominio del perfil de suelo. Adicionalmente, se concluye que entre mayor es la geometría del suelo, mayor es el número de nodos y elementos creados por el software, por lo cual, en temas de tiempos, se hace más lenta la obtención de resultados con dominios muy amplios que aquellos en los que el dominio es mucho más pequeño. Esto también va a depender en gran medida del equipo de cómputo que se esté empleando, pero, si se compara con la obtención de resultados por el método de las ecuaciones clásicas, es evidente que estas últimas se realizan de una manera más rápida ya que basta con realizar una hoja de cálculo en Excel donde se programen las fórmulas de Meyerhof y Terzaghi para obtener la cantidad de datos de capacidad portante que se requieran en tiempos más reducidos.

A nivel de parámetros geotécnicos del suelo, cabe recalcar que los resultados están basados en el uso de un modelo del suelo elástico-plástico perfecto, por lo tanto, para estudiar con mayor detalle este aspecto hay que realizar un análisis con un modelo elástico-plástico no lineal.

Por lo anterior, se concluye que para el estudio de la rigidez realizando variaciones en el módulo elástico, dicho modulo, no afecta la capacidad portante última de los suelos, es decir, para cualquier valor de módulo elástico que se le ingresara al suelo analizado, el software para este tipo de modelo en estudio no lo tendría en cuenta al momento de presentar los resultados de capacidad portante última, esto se evidenció igualmente haciendo uso de las ecuaciones clásicas de Terzaghi y Meyerhof. Adicionalmente, a nivel de parámetros de resistencia, se concluye que estos últimos si afectan la capacidad portante del suelo, ya que, al realizar variaciones en la cohesión y el ángulo de fricción, se pudo observar cambios en los resultados de capacidad portante por cualquiera de los métodos de estudio.

**Referencias Bibliográficas**

Alva, J. E. (s.f.). *Diseño de cimentaciones*. Editorial: Fondo editorial ICG.

Das, Braja M. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*, séptima edición. México: Editorial International Cengage Learning.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. (s.f.). 3 *critérios de rotura y clasificaciones geomecánicas*. 18-19. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6529/06.pdf>

Flores, A. (s.f.). *Cimentaciones*. 1-3. Recuperado de: <https://docs.google.com/document/d/1hrs8W-sx5PPLqmtCRracreDcCWYYPPfQM-sV3J4FZ1E/edit>.

GEO5 Software Geotécnico. (10 de julio de 2020a). *Características principales de GEO 5*. Recuperado de: <https://www.finesoftware.es/software-geotecnico/geo5-programas/#analytical-methods>.

GEO5 Software Geotécnico. (10 de julio de 2020b). *Archivos de investigación*. Recuperado de: <https://www.finesoftware.es/software-geotecnico/>

Naranjo, H., y Dranichnikov, T. (2012). *Cálculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.

Teniente, A., y Román, E. (2016). *Análisis comparativo en la determinación de la capacidad admisible por los métodos de Terzaghi y Meyerhof, para el diseño de cimentaciones superficiales según las características del suelo de Inquilpata del Distrito de Anta.* (Tesis de grado). Universidad Andina del Cusco, Cusco, Perú.

Zuloaga, I. (s.f), *Casos prácticos de aplicación del método de los elementos finitos en la reducción del riesgo geotécnico.* 1-6. Recuperado de: [https://data.fine.cz/handbooks-chapter-pdf/15\\_jornadas\\_hl\\_ingeosolum\\_ignacio\\_zuloaga.pdf](https://data.fine.cz/handbooks-chapter-pdf/15_jornadas_hl_ingeosolum_ignacio_zuloaga.pdf)