

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE PILOTES EN SUELOS
ESTRATIFICADOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE ELEMENTOS FINITOS**

**CAMILO ANTONIO BALLESTEROS LUNA
DIANA MARCELA FRANCO DURAN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2013**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE PILOTES EN SUELOS
ESTRATIFICADOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE ELEMENTOS FINITOS**

**CAMILO ANTONIO BALLESTEROS LUNA
DIANA MARCELA FRANCO DURAN**

**Trabajo de grado modalidad Investigación para optar al título de:
Ingeniero Civil**

**Director:
VLADIMIR ERNESTO MERCHAN JAIMES
PhD. Ing. Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

Dedicado a DIOS por concederme la oportunidad de alcanzar este momento tan esperado en mi vida, por darme fortaleza en los momentos difíciles, y por ayudarme a ser cada vez mejor persona con cada una de las experiencias vividas en esta etapa de mi vida.

A mi madre Lilia Luna Remolina quien ha sido mi amiga incondicional, mi apoyo constante, este logro es tan mío como de ella.

A mi familia que siempre creyó en mis capacidades han sido una compañía muy importante y especial en este proceso, por su cariño y amor.

A mis amigos por todos los buenos e inolvidables momentos vividos, porque cada uno de ellos me ayudo a alcanzar esta meta y siempre estarán presentes en mi memoria, a todos muchas gracias.

Camilo Antonio Ballesteros Luna

DEDICATORIA

Primeramente me gustaría agradecer a Dios, por permitirme alcanzar y ser parte de este importante logro en mi vida, con certeza sé que sin él no hubiese sido posible lograrlo. Gracias a él tuve fuerzas para seguir luchando aun cuando se me presentaban mil y un obstáculos en el camino o cuando las cosas no me estaban saliendo muy bien, él y solo él me ha guiado a ser la persona que soy ahora y de quien me siento muy orgullosa, él me motiva a seguir soñando, a seguir triunfando y a dar lo mejor de mi siempre. Infinitas gracias por estar siempre conmigo.

Dedico esta tesis a mi familia, pues son ellos quien siempre me han brindado su amor, apoyo, comprensión, atención y han estado conmigo en los buenos y malos momentos de mi vida.

A mi padre, por ser la persona de quien adquiriré mi gusto por el estudio, lo admiro por la calidad de persona que es, que nunca se cansa de aprender, emprendedora que ante las muchas dificultades que se le han presentado en la vida, persiste y sigue luchando, es así como quiero ser yo. Se sentirá muy orgulloso de mí por este logro y espero no defraudarlo a largo del camino que me falta por recorrer.

A mi madre, por tratar de darme siempre lo mejor, sé que no ha sido fácil, ha sido una lucha constante; solo Dios sabe cuánto le ha costado y para ella solo tengo palabras reconfortantes “algún día podre retribuirte todo el esfuerzo y sacrificio que has hecho por mí, bien sabe Dios qué es lo que más anhelo: darle a ella y a mis hermanos una mejor calidad de vida”.

No puedo pasar por alto, a mi nona, a quien siempre le estaré agradecida y con quien estaré en deuda pues no tendré como pagarle todo lo que ha hecho por mí. Sin su ayuda y sus atenciones no hubiese sido posible sacar adelante mi carrera.

Finalmente, pero no menos importante: Andrés. Agradezco a Dios, por cruzar nuestros caminos, no una sino dos veces. Él ha estado conmigo en las buenas y en las malas durante los últimos dos años y medio, me ha motivado en los momentos en que he querido renunciar y me he dicho a mi misma que no puedo, nunca me ha dejado desfallecer, ha sacado lo mejor de mi, quienes lo conocen podrán dar fe de la excelente persona que es, soy muy afortunada de poder aprender de él, para Andrés mi profunda admiración, cariño y agradecimiento.

Diana Marcela Franco Durán

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, por brindarnos la oportunidad de crecer integralmente en todos los aspectos de nuestra vida, gracias por abrirnos sus puertas y ofrecernos espacios tanto educativos como culturales, que hicieron de nosotros profesionales con un gran nivel académico y ética profesional, sin duda alguna este recinto fue nuestro segundo hogar y será recordado por siempre.

Agradecemos a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, a todos sus empleados de planta física y muy especialmente a nuestros profesores, quienes con su excelente formación académica y gran calidad profesional, cumplieron exitosamente la labor de educarnos y formarnos como profesionales íntegros a servir a nuestra sociedad; gracias por sus conocimientos, por sus consejos, por motivarnos a ser mejor cada día y por sacar el máximo potencial de nosotros.

Damos las gracias a nuestro director del proyecto y amigo el Ing., M. sc., Phd, Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, por creer en nuestras capacidades y permitirnos desarrollar esta investigación, agradecemos por el apoyo y asesoría incondicional que nos brindo. Su conocimiento, sus recomendaciones, y su calidad profesional junto con nuestro excelente trabajo en equipo hicieron que los resultados obtenidos a partir de la realización de este proyecto fueran demasiado gratificantes.

Así mismo nos gustaría agradecerle al Ing. M.sc. Wilfredo del Toro, quien muy amablemente nos colaboró en la resolución de dudas que se nos fueron presentando a lo largo de la investigación.

A familiares y amigos que siempre nos brindaron su apoyo y que con su alegría y comprensión han hecho que esta meta sea posible, a todos muchas gracias.

Camilo Antonio Ballesteros Luna

Diana Marcela Franco Durán

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	20
1. CAPACIDAD PORTANTE DE CARGA VERTICAL DE UN PILOTE	23
1.1 Mecanismo de transferencia de carga	23
1.1.1 Para un Pilote.	23
1.1.2 Para una Pila.	25
2. RESISTENCIA ÚLTIMA LATERAL DE PILOTES	25
3. GRUPO DE PILOTES	26
3.1 Espaciamiento entre pilotes	28
3.2 Eficiencia del grupo de pilotes	29
3.3 Capacidad portante de un grupo de pilotes	32
3.3.1 Grupo de pilotes embebidos en gravas y suelos arenosos.	32
3.3.2 Grupo de pilotes perforados en arenas y gravas.....	33
4. ANALISIS DE ESFUERZOS Y DESPLAZAMIENTOS ENTRE EL SUELO Y EL PILOTE	36
4.1 CASO Arcilla – Arena (Saturado) Bajo carga vertical	37
4.2 CASO Arcilla – Arena (Saturado) Bajo Carga Horizontal	40
5. RESULTADOS	47
5.1 Pilote Individual bajo carga vertical	47
5.2 Pilote Individual Bajo Carga Horizontal	51
5.3 Grupo de pilotes Bajo Carga Vertical	54
6. CONCLUSIONES	74

7. RECOMENDACIONES	77
8. ANEXOS.....	78
8.1 Pasos para modelar en PLAXIS 3D.....	78
9. BIBLIOGRAFÍA.....	84

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mecanismo de transferencia de carga en pilotes	24
Figura 2. Capacidad Última de carga para pilas perforadas: Pila Recta.....	25
Figura 3. Pilote sometido a fuerzas horizontales.....	26
Figura 4. Grupo de Pilotes. Figura 5. Tipo de Grupo de pilotes.....	27
Figura 6. Bulbo de esfuerzos de un grupo de pilotes	27
Figura 7. Separación de los pilotes.....	28
Figura 8. Eficiencia de un grupo de pilotes.....	30
Figura 9. Falla en bloque de un grupo de pilotes en suelos cohesivos.....	35
Figura 10. Relación carga última de grupo de pilotes.....	35
Figura 11. Ejemplo Caso Arcilla - Arena bajo Carga Vertical.....	37
Figura 12. Perfil del suelo y Vista 3D en Plaxis.....	39
Figura 13. Porcentaje de carga que soporta el Pilote vs Desplazamiento	39
Figura 14. Ejemplo Caso Arena – Arcilla (Saturado) bajo Carga Vertical.....	40
Figura 15. Porcentaje de carga que soporta el Pilote vs Desplazamiento.....	41
Figura 16. Ejemplo Caso Arcilla - Arena bajo Carga Vertical	42
Figura 17. Parámetros del Suelo en Plaxis 3D.....	43
Figura 18. Perfil del Suelo.....	44
Figura 19. Definición de la Viga Cabezal.....	44
Figura 20. Sección Transversal del Pilote.....	45
Figura 21. Ubicación de los Pilotes.....	45
Figura 22. Técnica de Elementos Finitos.....	46
Figura 23. Porcentaje de carga que soporta la Pilote vs Desplazamiento	46
Figura 24. Gráfica de resultados Capacidad de Carga Última vs Diámetro del pilote.....	47
Figura 25. Gráfica de Resultados Desplazamiento de Rotura Vs Diámetro [m].....	48
Figura 26. Condiciones de borde Plaxis 3D.....	49
Figura 27. Gráfica de resultados Capacidad de Carga Última vs Diámetro del pilote.....	50

Figura 28. Análisis de la Influencia del Nivel Freático.	51
Figura 29. Gráfica de Resultados Capacidad Carga Horizontal Última Vs Diámetro.	52
Figura 30. Gráfica de Resultados Capacidad Carga Horizontal Última Vs Diámetro.	53
Figura 31. Análisis de la Influencia del Nivel Freático.	54
Figura 32. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última 2,3 y 4 pilotes. d=0.7m...	55
Figura 33. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última 2,3 y 4 pilotes. D=1m	56
Figura 34. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última 2,3 y 4 pilotes. d=2m.....	58
Figura 35. Distribución de Esfuerzos Cortantes. Vista en Perfil Arena L=6m	58
Figura 36. Distribución de Esfuerzos Totales. Vista en Planta. Arena L=6m	59
Figura 37. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última 2,3 y 4 pilotes. d=0.7m...	59
Figura 38. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última 2,3 y 4 pilotes. d=1m.....	60
Figura 39. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última 2,3 y 4 pilotes. d=2m.....	60
Figura 40. Distribución de Esfuerzos Totales en Arena. Vista en Planta. Arena L=8m...	61
Figura 41. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última 2,3 y 4 pilotes. d=0.7m...	62
Figura 42. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última 2,3 y 4 pilotes. d=1m.....	62
Figura 43. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última 2,3 y 4 pilotes. d=2m.....	63
Figura 44. Distribución de Esfuerzos Totales. Vista en Planta. Arena L=15m	63
Figura 45. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última 2,3 y 4 pilotes. d=0.7m...	65
Figura 46. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última 2,3 y 4 pilotes. d=1m.....	65
Figura 47. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última 2,3 y 4 pilotes. d=2m.....	66
Figura 48. Distribución de Esfuerzos Cortantes Plaxis 3D. Vista en Perfil .Arcilla L=6m.	66
Figura 49. Distribución de Esfuerzos Totales Plaxis 3D. Vista en Planta. Arcilla L=6m ...	67
Figura 50. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última 2,3 y 4 pilotes. d=0.7m...	68
Figura 51. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última 2,3 y 4 pilotes. d=1m.....	69
Figura 52. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última 2,3 y 4 pilotes. d=2m.....	69
Figura 53. Distribución de Esfuerzos Totales. Vista en Planta. Arcilla L=8m.....	70
Figura 54. Distribución de Esfuerzos Totales. Vista en Planta. Arcilla L=15m.....	70
Figura 55. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última 2,3 y 4 pilotes. d=0.7m...	71
Figura 56. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última 2,3 y 4 pilotes. d=1m.....	72
Figura 57. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última 2,3 y 4 pilotes. d=2 m.....	72
Figura 58. Gráfica de la ventana de entrada de datos generales del software	78
Figura 59. Gráfica de la ventana de modelación de los materiales en el PLAXIS 3D.	79
Figura 60. Ventana de la herramienta BOREHOLE en PLAXIS 3D.....	79

Figura 61. Ventana de modelación de la sección transversal de la cimentación.	80
Figura 62. Gráfica de la asignación de la longitud del pilote a modelar.	80
Figura 63. Gráfica del punto de carga sobre el cual se asigna la sollicitación del pilote. ...	81
Figura 64. Gráfica de la malla en 3D del modelo de suelo a analizar.	81
Figura 65. Gráfica de la etapa de construcción y carga del pilote a modelar.	82
Figura 66. Gráfica de los puntos de control en la malla de modelación.	82
Figura 67. Gráfica de la losa de cimentación y la ventana de modelación de elementos tipo FLOOR.	83

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos de los estratos para el análisis de esfuerzos y desplazamientos.	36
Tabla 2. Datos de los estratos para el análisis de grupo de pilotes.	41

RESUMEN

TITULO:

Evaluación del comportamiento de pilotes en suelos estratificados mediante la técnica de elementos finitos.*

AUTORES:

Camilo Antonio Ballesteros Luna **

Diana Marcela Franco Duran **

PALABRAS CLAVES:

Capacidad de Carga Última, Pilotes, PLAXIS 3D, Métodos Convencionales, Métodos Numéricos.

CONTENIDO:

En el cálculo y diseño de las cimentaciones profundas se requiere que el ingeniero civil en el ejercicio de su profesión no se confíe en el valor que arroja una fórmula y que así mismo tenga la capacidad de comprender e identificar si los resultados obtenidos a partir de un software de modelación son los más indicados para resolver un problema de ingeniería, teniendo en cuenta las variables que involucra.

En la presente investigación se plantea estudiar la influencia que generan la variación de los parámetros geotécnicos en suelos estratificados en el comportamiento esfuerzo-deformación del sistema suelo-pilote y grupo de pilotes, con la intención de comparar los resultados que se obtienen a partir de la aplicación de diferentes métodos de cálculo, y de esta manera conocer el grado de confianza de las metodologías, analizando cuál de éstas se acerca más al comportamiento real de los pilotes.

Se realizaron un número importante de simulaciones a partir del software Plaxis 3D mediante la técnica de elementos finitos y se aplicaron algunos métodos convencionales, observándose el comportamiento de los pilotes, pilas y grupo de pilotes para diferentes condiciones geométricas, propiedades físicas y de resistencia del suelo y del elemento estructural.

El análisis de resultados obtenidos nos permitió establecer un mayor grado de confianza hacia los valores que arroja PLAXIS 3D, a pesar de que para algunos casos los métodos convencionales presentaban tendencias similares a las obtenidas por los métodos numéricos, estos últimos resultan ser más apropiados porque cumplen con las condiciones hidráulicas y con la física del problema.

* Trabajo de Grado

**Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Director PhD. Ing. Vladimir Ernesto Merchán

SUMMARY

TITLE:

Assessment of the behavior of piles in layered soils using finite element technique *

AUTHOR:

Camilo Antonio Ballesteros Luna **

Diana Marcela Franco Duran **

KEYWORDS:

Ultimate Load Bearing, Capacity, Pile, PLAXIS 3D, Standard Methods, Numeric Methods.

ABSTRACT:

The estimate and design of deep foundation require that, a civil engineer in the development of his/her profession doesn't trust in the result of an equation, and at the same time, he/she has the ability to understand and to identify, if the results obtained by using simulation software are the most indicate to solve an engineering problem, taking into account all possible variables that it has.

The current investigation studies the influence that produces the variation of geotechnical parameters in the behavior stress – deformation, applied to layered soils for single pile and pile group. The goal is compare the results obtained from different methods to determine ultimate load bearing capacity. In that way, we will know the confidence of methodologies used and we will could analyze, which of these are closer to real behavior of single pile and pile group.

We carry out an important number of simulation thanks to Plaxis 3D, it uses the finite element technique, and besides we applied some standard methods. We compared the results obtained by both ways and analyzed the behavior of deep foundations under different: geometric conditions and soil properties.

The results we obtained from this analysis allowed us to establish the greater degree of values of the Plaxis 3D. Although in some cases the conventional methods have a tendency to be similar to the numerical methods. On the other hand, these results can prove to be more appropriate to complete the hydraulic conditions with the problem of physics.

***Thesis**

**Physics- Mechanics Engineering Faculty

Civil Engineering School

Director PhD. Ing. Vladimir Ernesto Merchán

INTRODUCCION

En la ingeniería de fundaciones, las cimentaciones profundas como pilas y pilotes son muy utilizadas en la solución de diferentes problemas del suelo que se presentan usualmente en cualquier tipo de estructura civil. Debido a esto, se hace necesario que en su diseño y cálculo deba garantizarse que estas cimentaciones se comporten de una manera adecuada y eficiente.

Existen diversos métodos de diseño para calcular la capacidad de carga de los pilotes y pilas, mediante modelos y formulas aproximadas que fueron desarrolladas bajo diferentes ensayos de laboratorio y que se han utilizando durante varios años en el campo de la geotecnia. A éstos comúnmente los conocemos como métodos convencionales y tienen en cuenta el tipo de suelo, sus propiedades de resistencia, el número de pilotes y su geometría. Si bien es cierto que éstos métodos permiten obtener un valor de capacidad de carga de la fundación, son muy limitados y presentan algunas incertidumbres que son resueltas bajo el uso de factores de seguridad que nos arrojan una estimación de la capacidad de carga que puede presentar la cimentación. Sin embargo, la mayoría de las veces, no se utiliza la resistencia real de la fundación y por ende no se puedan realizar diseños totalmente eficientes.

Por otra parte, el desarrollo de tecnologías computacionales ha permitido la implementación de programas, los cuales tienen la capacidad de resolver problemas de ingeniería mediante la técnica de elementos finitos. Para la ingeniería civil en la rama de la geotecnia, contamos con PLAXIS 3D, que es un

software que permite una simulación más realista del comportamiento esfuerzo - deformación de los pilotes; ya que no cuenta con la limitante de trabajar en dos dimensiones y considerar un espesor unitario en sus simulaciones como es el caso de PLAXIS 2D.

Este trabajo tiene como finalidad estudiar la influencia que generan la variación de los parámetros geotécnicos en suelos estratificados en el comportamiento esfuerzo-deformación del sistema suelo-pilote y grupo de pilotes; ya que estos suelos corresponden a las condiciones más comunes que se encuentran en la práctica ingenieril. De hecho, el efecto de la heterogeneidad del terreno responde normalmente a la mayor incertidumbre en el diseño de pilotes.

De lo anterior, se busca comparar los resultados de capacidad última de carga, (carga de rotura) que se obtienen a partir de las metodologías convencionales con los resultados que arrojan las simulaciones numéricas realizadas en PLAXIS 3D, con el fin último de realizar un análisis de sensibilidad de los métodos de cálculo utilizados y como es de esperarse observar si existe una diferencia notoria entre los dos métodos o si por el contrario éstos presentan una tendencia similar en los valores que se obtienen.

Una vez estudiadas las metodologías convencionales y el correcto funcionamiento de PLAXIS 3D, se realizaron diferentes modelos en el software, modificando la geometría del elemento estructural y las características del suelo, bajo la aplicación constante de una carga última. A partir de los valores obtenidos se grafico el comportamiento de la capacidad de carga para cada una de las metodologías utilizadas con el fin de facilitar su interpretaron y análisis.

En el capítulo 1 y 2 de la presente tesis, se encontrara el comportamiento de los pilotes y pilas sometidos a carga vertical y horizontal respectivamente, en el capítulo 3 se encuentra lo referente a grupo de pilotes, en el capítulo 4, 5 y 6 se detallaran algunos cálculos tipo de las metodologías convencionales y métodos numéricos utilizados para diferentes casos, y se presentaran todos los resultados con sus respectivas conclusiones. Finalmente como anexo, se adjuntan cada una de las metodologías convencionales para el cálculo de la capacidad de carga de los pilotes y pilas.

El análisis de resultados obtenidos permitió establecer un mayor grado de confianza hacia los valores que arroja PLAXIS 3D, a pesar de que los métodos convencionales para algunos casos presentan una tendencia similar a los métodos numéricos, estos últimos resultan ser más apropiados porque cumplen con las condiciones hidráulicas y con la física del problema.

Por otra parte, se observó que para los diferentes casos estudiados de grupos de pilotes, no se presentó una tendencia de comportamiento específico, por lo que se genera una incertidumbre al tratar de predecir su comportamiento bajo estratos de suelos arcilloso y granular.

1. CAPACIDAD PORTANTE DE CARGA VERTICAL DE UN PILOTE

La capacidad portante de un pilote depende de (Murthy, 2002):

- Tipo, tamaño y longitud del pilote.
- Tipo de suelo.
- Método de instalación.

La capacidad portante incrementa con el aumento del tamaño y longitud del pilote. La posición del nivel freático, también afecta su capacidad (Davis, 1980).

Con el propósito de diseñar un pilote de forma segura y económica, se debe analizar la interacción existente entre el pilote y el suelo, determinar el modo de falla y estimar los asentamientos que producen las cargas muertas, cargas de servicio, etc. El diseño debe cumplir con los siguientes requerimientos (Murthy, 2002):

1. Este debe ser seguro ante cualquier posible falla, el factor de seguridad usado depende de la importancia de la estructura y de la confiabilidad de los parámetros del suelo y del sistema de cargas usado en el diseño.
2. Los asentamientos deben ser compatibles con el adecuado comportamiento de la estructura, evitando perjudicar su eficiencia.

1.1 Mecanismo de transferencia de carga

1.1.1 Para un Pilote: Cuando la carga última es aplicada en la parte superior del pilote Q_u , una parte de la carga se transmite al suelo a lo largo de la longitud del

pilote (carga última por fricción Q_f) y la otra parte es transmitida al suelo que se encuentra en la base del pilote (carga por la punta del pilote Q_p .) (Murthy, 2002).

La carga última de un pilote se expresa como:

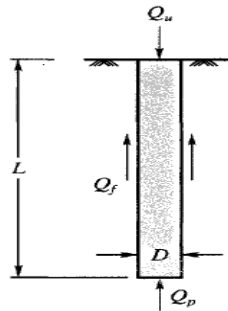
$$Q_u = Q_p + Q_f - W_p$$

$$W_p = A_p \sigma'_{vb}$$

$$Q_p = A_p [C_u N_c + \sigma'_{vb} N_q + 0.3 \gamma D N_\gamma]$$

$$Q_f = P \int_0^L [C_a + \bar{\sigma}'_{vb} K_s \tan \Phi_a] dz$$

Figura 1. Mecanismo de transferencia de carga en pilotes



(Murthy, 2002).

Siendo:

$W_p; A_p; P; D$ El peso, el área, perímetro y diámetro del pilote respectivamente.

$N_c; N_\gamma; N_q$ Factores de capacidad de carga.

C_u Cohesión del suelo en la punta del pilote.

C_a Adhesión no drenada.

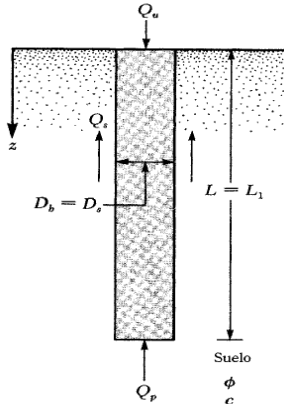
σ'_{vb} Esfuerzo vertical efectivo medio en la longitud.

$\bar{\sigma}'_{vb}$ Esfuerzo vertical efectivo en la punta del pilote.

Φ_a Ángulo de fricción suelo – pilote

1.1.2 Para una Pila: El mecanismo de transferencia de carga de las pilas perforadas al suelo es similar al que ocurre en los pilotes hincados (Das, 1999).

Figura 2. Capacidad Última de carga para pilas perforadas: Pila Recta



(Das, 1999)

$$Q_u = Q_p (\text{Punta}) + Q_s (\text{Fricción})$$

La capacidad neta en la base de la pila, hace referencia a la carga total menos el peso de la pila, y se expresa como:

$$Q_p = A_p c N_c^* + q' (N_q^* - 1)$$

La expresión para la resistencia por fricción o superficial es similar a la de los pilotes hincados:

$$Q_f = \int_0^L p * f * dz$$

Siendo:

q' Esfuerzo vertical efectivo al nivel del fondo de la pila.

p Perímetro del fuste de la pila.

f Resistencia unitaria por fricción o superficial.

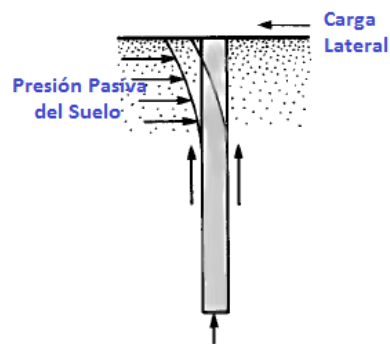
2. RESISTENCIA ÚLTIMA LATERAL DE PILOTES

Los pilotes están frecuentemente sometidos a cargas laterales y movimientos. Por ejemplo: en las estructuras de los muelles y puertos, las fuerzas horizontales son causadas por el impacto de barcos durante la acción de las olas; las estructuras

marítimas están sometidas al viento y a la acción de las olas y las estructuras construidas en zonas altamente sísmicas como Japón y el occidente de la costa de los Estados Unidos, países donde algunos códigos o normas especifican la carga lateral que los pilotes deberían ser capaces de resistir. (10% de la Carga axial aplicada) (Davis, 1980).

Un pilote resiste cargas horizontales movilizándose la presión pasiva en el lugar que lo rodea, como se muestra en la Figura 3 (Das, 1999).

Figura 3. Pilote sometido a fuerzas horizontales.



(Das, 1999).

- Un adecuado factor de seguridad.
- Una deformación aceptable a la carga de trabajo.

En muchos casos prácticos, el diseño de pilotes cargados lateralmente dependerá de un límite lateral de deformación requerida (Davis, 1980)

En un diseño de cimentaciones dos criterios deberían satisfacerse (Davis, 1980):

3. GRUPO DE PILOTES

En muy raras ocasiones encontramos estructuras cimentadas sobre pilotes individuales. Normalmente encontraremos un mínimo de tres pilotes bajo una

columna o un elemento de cimentación, debido a los problemas de alineamiento y excentricidad que se presentan (Murthy, 2002).

Para examinar el comportamiento de un grupo de pilotes, es necesario distinguir estos dos grupos (Davis, 1980):

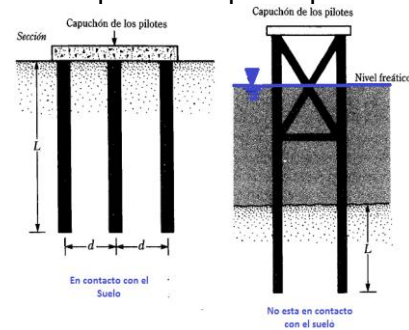
- La viga cabezal (pile cap) del grupo de pilotes esta en contacto con el terreno.
- La viga cabezal (pile cap) del grupo de pilotes no esta en contacto con el terreno.

Lo anteriormente mencionado, puede observarse en la Figura 5.

Figura 4. Grupo de Pilotes.



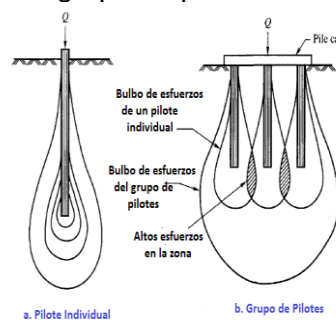
Figura 5. Tipo de Grupo de pilotes



(Das, 1999)

Google Imágenes.

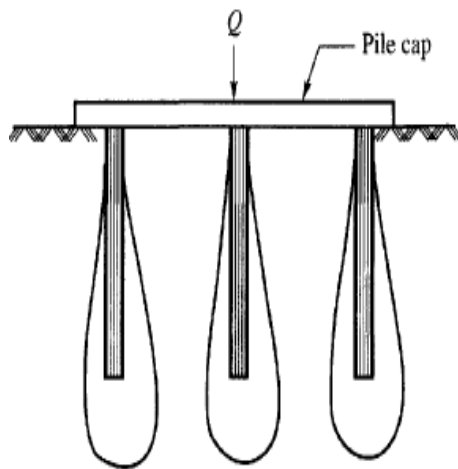
Figura 6. Bulbo de esfuerzos de un grupo de pilotes



(Murthy, 2002)

El bulbo de esfuerzos de un pilote individual bajo la aplicación de una carga se muestra en la Figura 6a. Cuando los pilotes se colocan en grupos, existe la posibilidad que el bulbo de esfuerzos de los pilotes adyacentes se superponga uno con otro, tal como se muestra en Figura 6b.

Figura 7. Separación de los pilotes.



(Murthy, 2002)

En las zonas donde se superponen los bulbos de esfuerzos de cada pilote, se presentan esfuerzos grandes. Si esta superposición de esfuerzos se extiende a una profundidad mayor debajo del pilote, el suelo falla o se asienta excesivamente. Esta superposición de esfuerzos se puede evitar si la instalación de los pilotes se hace más separadamente (Murthy, 2002).

3.1 Espaciamiento entre pilotes:

El espaciamiento entre pilotes dependerá de muchos factores como (Murthy, 2002):

- Superposición de esfuerzos de pilotes adyacentes.
- Costo de la Cimentación.
- Eficiencia del grupo de pilotes.

Cuando se hinca un pilote deberá ser mayor la superposición de esfuerzos que se generara debido al movimiento del suelo. Si el desplazamiento del suelo compacta

el suelo que se encuentra entre los pilotes como por ejemplo arenas sueltas, los pilotes podrán ser colocados en intervalos de separación más cercanos (Murthy, 2002).

Pero si los pilotes son hincados en arcillas saturadas, el desplazamiento del suelo no compacta el suelo que se encuentra entre los pilotes, como resultado este suelo podría moverse hacia arriba y el proceso levantaría la viga cabezal. Un mayor espaciamiento es requerido en este tipo de suelos con el objetivo de evitar el levantamiento del pilote (Murthy, 2002).

Cuando los pilotes son colocados in situ, se permiten espaciamientos más pequeños (Murthy, 2002).

El valor mínimo permitido de espaciamiento entre pilotes, se encuentra en los códigos de construcción. Para pilotes de diámetro variable el espaciamiento puede variar entre 2 a 6 veces el diámetro del pilote. Para pilotes de fricción el espaciamiento mínimo recomendado es de 3 veces el diámetro del pilote. Para pilotes de carga de punta que pasan a través de un estrato relativamente compresible, el espaciamiento entre pilotes no debe ser menor a 2.5 veces el diámetro del pilote. Para un pilote de carga de punta pasando por un estrato compresible y resistido por una arcilla rígida el espaciamiento puede incrementarse hasta 3.5 veces el diámetro del pilote. Para pilotes de compactación el espaciamiento puede ser de 2 veces el diámetro del pilote (Murthy, 2002).

3.2 Eficiencia del grupo de pilotes:

Se acostumbra a relacionar la capacidad de carga última de un pilote, con la capacidad de carga de un pilote individual, por medio de un factor de eficiencia n (Davis, 1980):

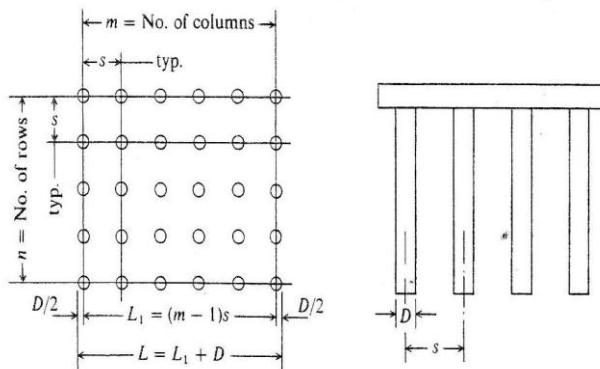
$$n = \frac{\text{Capacidad de carga del grupo de pilotes}}{\text{Sumatoria de la capacidad de carga de cada pilote individual}}$$

La eficiencia del grupo de pilotes depende de (Murthy, 2002):

- El tipo de suelo en el cual el pilote esta embebido.
- Método de instalación de l pilote. (Hincado, Colocado in situ)
- Espaciamiento entre pilotes.

Existen varias formulas para calcular la eficiencia como la de Converse-Labarre. Esta formula es empírica y arroja un factor de eficiencia menor a uno. Pero cuando los pilotes son instalados en arena, se pueden obtener factores de eficiencia mayores a uno como lo demostró Vesic (1967) en su investigación experimental en grupos de pilotes en arenas. No existen suficientes evidencias experimentales para determinar la eficiencia de un grupo de pilotes embebidos en suelos arcillosos (Murthy, 2002).

Figura 8. Eficiencia de un grupo de pilotes



(Bowles, 1997)

$$E = 1 - \frac{\theta(n - 1)m + (m - 1)n}{90mn}$$

Donde:

D: diámetro del pilote

m: numero de columnas de pilotes en un grupo.

S: espaciamiento de pilotes entre centro y centro.

n: numero de filas

$$\theta = \tan^{-1} \frac{D}{S} \text{ [grados]}$$

▪ **Eficiencia de un grupo de pilotes en arenas:**

A partir de las pruebas realizadas por Vesic (1967), se puede mencionar que un grupo de pilotes con “pile cap” apoyado sobre la superficie, toma mas carga que un grupo de pilotes de cabeza libre por encima de la superficie. Una parte de la carga es tomada directamente por el suelo que se encuentra debajo de la viga cabezal y el resto es tomado por los pilotes. La viga cabezal se comporta de la misma manera que una fundación superficial del mismo tamaño (Murthy, 2002).

Vesic demostró por primera vez que el incremento de la capacidad portante de un grupo de pilotes hincados en arenas proviene de un incremento de la carga por fricción. La carga puntual es independiente de la acción del grupo de pilotes (Murthy, 2002).

Cuando un grupo de pilotes es hincado dentro de arenas sueltas, el suelo que se encuentra alrededor y entre los pilotes, llega a ser altamente compactado; si la separación entre los mismos es relativamente cercana (menos de 6 veces el diámetro del pilote), la capacidad de carga del grupo de pilotes podría ser mayor que la suma de las capacidades de los pilotes individualmente y esto es debido a que la eficiencia del grupo de pilotes es mayor a 1 (Davis, 1980).

Por otra parte si la arena es muy densa, y el hincado del pilote produce un ablandamiento en vez de compactación en el suelo, la eficiencia del grupo de pilotes podría ser menor a 1 (Davis, 1980).

3.3 Capacidad portante de un grupo de pilotes

3.3.1 Grupo de pilotes embebidos en gravas y suelos arenosos: Si los pilotes son hincados en arenas blandas y gravas, el suelo alrededor del pilote a un radio de al menos de tres veces el diámetro del pilote se compacta.

Cuando los pilotes son hincados en un grupo a un espaciamiento cercano, el suelo alrededor y entre ellos llega a ser altamente compactado. Cuando el grupo de pilotes es cargado, los pilotes y el suelo entre ellos, se mueven juntos como una unidad (Murthy, 2002).

Normalmente se asume que la eficiencia corresponde a la unidad cuando el espaciamiento entre pilotes se incrementa a cinco o seis veces el diámetro del pilote. Debido a que el presente conocimiento no es suficiente para evaluar la eficiencia para diferentes espaciamientos de pilotes, es conservativo asumir un factor de eficiencia igual a la unidad para un propósito práctico (Murthy, 2002).

$$Q_{ug} = n * E \sum Q_u \text{ para } n < 1$$

Donde n es el número de pilotes en un grupo, E la eficiencia del pilote y Q_u es la resistencia última de un pilote individual.

Este procedimiento no es aplicable si la punta del pilote descansa sobre suelos compresibles como lo son los limos y arcillas. Cuando esto sucede, el esfuerzo transferido al suelo compresible desde el grupo de pilotes podría dar lugar a un sobre esfuerzo o una consolidación. La capacidad de carga de un grupo de pilotes bajo estas condiciones es regida por la resistencia al corte y la compresibilidad del suelo, más que por la eficiencia del grupo de pilotes dentro del estrato de arena o grava (Murthy, 2002).

3.3.2 Grupo de pilotes perforados en arenas y gravas: Los pilotes perforados son fabricados in situ. El método de instalación consta de:

- Perforación de un hueco de diámetro y profundidad requerida.
- Vertimiento del concreto.

Siempre habrá un ablandamiento del suelo durante la perforación por lo que ésta debe realizarse por debajo del nivel freático. Aunque el lodo bentónico es usado para estabilizar los lados y la parte inferior del orificio, no evita que el suelo se afloje. Puesto que los pilotes perforados no compactan el suelo que se encuentra entre los pilotes, el factor de eficiencia no será mayor a la unidad. Sin embargo, para efectos prácticos, puede ser considerada igual a uno (Murthy, 2002).

Con base en las observaciones realizadas del comportamiento de grupos de pilotes en arena, se llega a las siguientes conclusiones (Das, 1999):

- Para grupos de pilotes hincados en arena donde $d \geq 3D$ Q_{ug} se toma como $\sum Q_u$ que incluye las capacidades de carga superficiales y de punta de los pilotes individuales (Das, 1999).
- Para grupos de pilotes perforados en arena con espaciamentos convencionales $d \approx 3D$, Q_{ug} se toma igual a $\frac{2}{3}$ a $\frac{3}{4}$ veces $\sum Q_u$ (capacidades de carga superficiales y de punta de los pilotes individuales) (Das, 1999).

3.3.3 Grupo de pilotes en suelos cohesivos: El efecto del hincado de pilotes en suelos cohesivos (limos y arcillas) es muy diferente al que se presenta en suelos granulares. Cuando los pilotes son hincados en suelos arcillosos, y el suelo es blando e inestable, es necesario remplazar ese suelo.

Además, existirán agitaciones del suelo que se encuentra entre los pilotes debido a la compactación e hincado de éstos, que no pueden ser alcanzados en presencia de suelos cohesivos de tan baja permeabilidad (Murthy, 2002).

Siempre existe la posibilidad de que el pilote se pueda levantar durante el proceso de agitación del suelo, por lo que se recomienda usar pilotes perforados en suelos cohesivos (Murthy, 2002) .

En caso de que se haga necesario hincar los pilotes, se deben seguir los siguientes pasos:

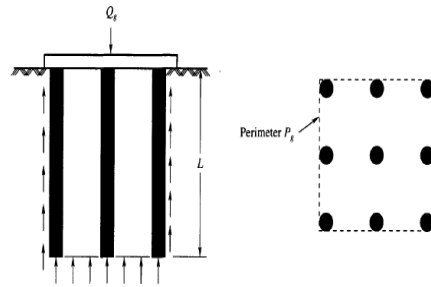
- Los pilotes deben ser espaciados a distancias mayores.
- Los pilotes deben ser hincados desde el centro del grupo hacia los extremos.
- La velocidad de hincado de cada pilote debe ser ajustada con el fin de minimizar el desarrollo de la presión de poros.

Resultados experimentales muestran que cuando un grupo de pilotes es instalado en suelos cohesivos bajo la acción de una carga, estos podrían fallar de cualquiera de las siguientes formas:

- Podrían fallar como un bloque. (Conocido como bloque de falla)
- Los pilotes podrían fallar individualmente.

Cuando el espaciamiento entre pilotes es pequeño, el suelo contenido entre los pilotes se mueve hacia abajo con los pilotes. Los pilotes y el suelo se mueven juntos formando la falla de bloque. Normalmente este tipo de falla ocurre cuando los pilotes son colocados a 2 o 3 veces el diámetro del pilote. Para mayores espaciamentos, los pilotes fallan individualmente.

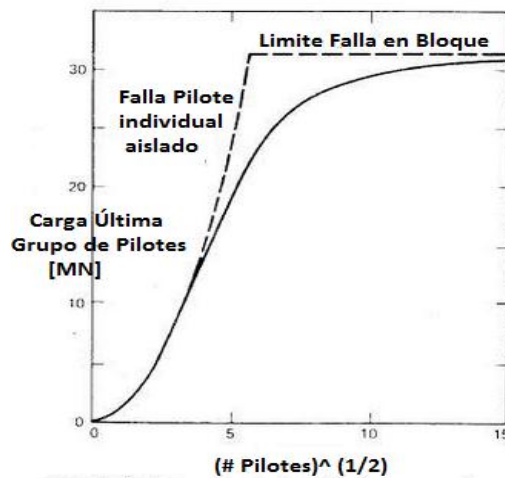
Figura 9. Falla en bloque de un grupo de pilotes en suelos cohesivos.



(Murthy, 2002)

En la Figura 10 se muestra la relación que existe entre el número de pilotes y la capacidad de carga última, se observa la transición entre la falla de un pilote individual y la falla en bloque a medida que el número de pilotes incrementa (Davis, 1980).

Figura 10. Relación carga última de grupo de pilotes.



(Davis, 1980)

A partir de diferentes pruebas llevadas a cabo para determinar la eficiencia de un grupo de pilotes en arcillas homogéneas, se resume que el mayor factor de eficiencia ocurre cuando (Davis, 1980):

- Los pilotes tiene una relación L/D pequeña.
- Grandes espaciamentos entre pilotes.
- Pequeño número de pilotes en el grupo.

4. ANALISIS DE ESFUERZOS Y DESPLAZAMIENTOS ENTRE EL SUELO Y EL PILOTE

Para el desarrollo del presente documento, asumiremos cimentaciones profundas con diámetro menor a 70 cm serán analizadas como pilotes e iguales o mayores a 70 cm de diámetro, serán consideradas como pilas.

En este capítulo se mostraran los cálculos tipo, para diferentes condiciones del suelo.

Se enfatiza que lo valores obtenidos corresponden a la carga última de los pilotes y pilas, es decir su carga de rotura; por lo que no es posible hablar de asentamientos; ya que estos deben ser obtenidos a partir de una carga de servicio; para deformaciones elásticas.

Tabla 1. Datos de los estratos para el análisis de esfuerzos y desplazamientos.

ARCILLA NO DRENADA		ARENA	
Eu [Mpa]	40	Eu [Mpa]	100
γ sat [KN/m3]	21	Φ [°]	32
Cu [KN/m2]	70	γ sat [KN/m3]	20
ν	0.49	γ_m [KN/m3]	19
		ν	0.2

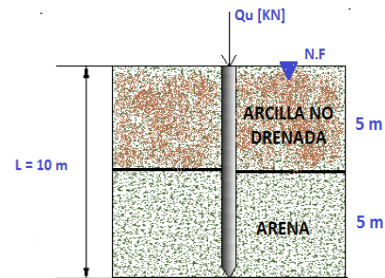
Autores

Los datos que se presentan en la Tabla 1, corresponden a los parámetros del suelo utilizados para evaluar la capacidad de carga horizontal y vertical de los pilotes individuales.

4.1 CASO Arcilla – Arena (Saturado) Bajo carga vertical

Figura 11. Ejemplo Caso Arcilla - Arena bajo Carga Vertical.

Diámetro [m]	0.5
Longitud [m]	10
Perímetro [m]	1.571
Área [m2]	0.196



Autores

CALCULO POR METODOS CONVENCIONALES

- **Arcilla no Drenada:**

$$Q_f = P C_a dz$$

Como $C_u > 24 \text{ KPa}$ consideramos una arcilla rígida y para calcular el valor de C_a , debemos encontrar el factor de adhesión $\frac{C_a}{C_u}$.

$$\frac{C_a}{C_u} = 0,5$$

$$C_a = 0,5 * 70 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} = 35 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

$$Q_f = 35 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} * 5 \text{ m} * 1.571 = 274.889 \text{ KN}$$

▪ **Arena:**

$$Q_u = A_p \sigma'_{vb} N_q + \int_0^L P \bar{\sigma}'_v K_s \tan \Phi'_a dz$$

$$\bar{\sigma}'_v = \left(5m * (21 - 10) \frac{KN}{m^3} \right) + \left(2.5 m * (20 - 10) \frac{KN}{m^3} \right) = 80 \frac{KN}{m^2}$$

Para determinar el valor $K_s \tan \Phi'_a$ tenemos que para pilotes pre-excavados:

$$\Phi = \Phi_1 - 3$$

$$\Phi = 32 - 3 = 29^\circ$$

Con $\Phi = 29^\circ$ se encuentra que $K_s \tan \Phi'_a = 1.05$

$$Q_f = 1.571 m * 80 \frac{KN}{m^2} * 1.05 * 5m = 659.73 KN$$

$$\sigma'_{vb} = \left(5 m * (21 - 10) \frac{KN}{m^3} \right) + \left(5 m * (20 - 10) \frac{KN}{m^3} \right) = 105 \frac{KN}{m^2}$$

Con $\Phi = 29^\circ$ encontramos un valor de $N_q = 30$.

$$Q_p = 0.196 m^2 * 105 \frac{KN}{m^2} * 30 = 618.5 KN$$

Chequeo:

$$Q_p \leq A_p 50 N_q \tan \Phi$$

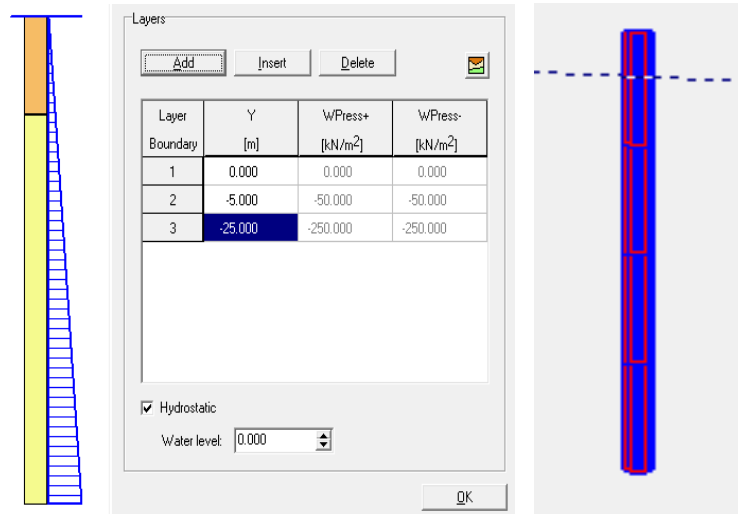
$$618.5 KN > 0.196 m^2 * 50 * 30 * \tan(29) = 163.25 KN$$

Por lo tanto $Q_p = 163.25 KN$

$$Q_u = 163.25 KN + 659.73 KN + 274.889 KN = \mathbf{1097.88 KN}$$

CALCULO POR METODO NÚMÉRICO

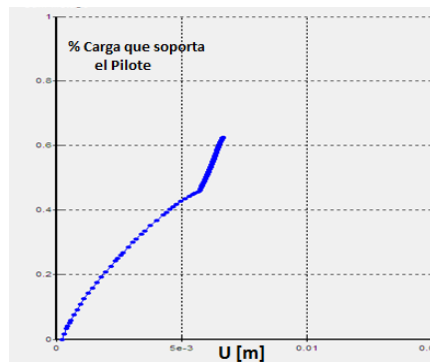
Figura 12. Perfil del suelo y Vista 3D en Plaxis.



PLAXIS 3D

La carga aplicada al pilote fue de 2000 [KN] y en la Figura 13 que se presenta a continuación observamos que el porcentaje de carga que soporta el pilote es del 63.1%; por lo que la capacidad del pilote es de 1262 [KN].

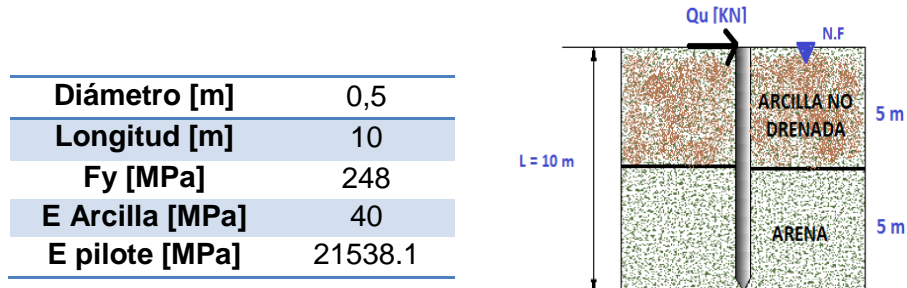
Figura 13. Porcentaje de carga que soporta el Pilote vs Desplazamiento



PLAXIS 3D

4.2 CASO Arcilla – Arena (Saturado) Bajo Carga Horizontal

Figura 14. Ejemplo Caso Arena – Arcilla (Saturado) bajo Carga Vertical.



Autores

CALCULO METODOS CONVENCIONALES

La relación $\frac{L}{D} = 20$; por lo que se considera un pilote largo.

$$I_p = \frac{\pi}{4} * \frac{D^4}{2} = \frac{\pi}{4} * \frac{0.5m^4}{2} = 0.0030 m^4$$

$$S_y = \frac{I_p}{\frac{D}{2}} = \frac{0.0030 m^4}{\frac{0.5m}{2}} = 0.0122 m^3$$

$$My = Fy * S_y = 0.0122 m^3 * 278 * 1000KPa = 3043.41 KN.m$$

$$\frac{My}{Cu D^3} = \frac{3043.41 KN.m}{70 \frac{KN}{m^2} * 0.5^3} = 347.81 KN$$

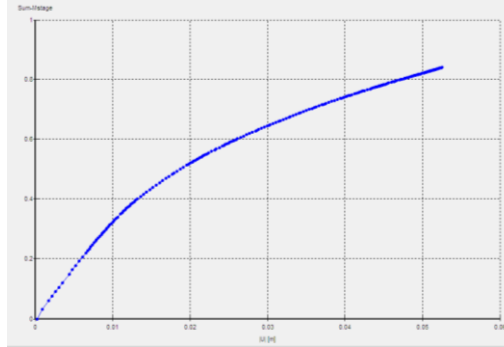
Con este valor encontramos el valor de la relación mediante las graficas del método y obtenemos:

$$\frac{Qu}{Cu D^2} = 67$$

$$Q_u = 67 * 70 \frac{KN}{m^2} * 0.5^2 = 1172.5 KN$$

METODO NÚMÉRICO

Figura 15. Porcentaje de carga que soporta el Pilote vs Desplazamiento.



Autores

La carga aplicada fue de 2000 KN y según la gráfica el pilote solo soporta el 85.2% de ésta, por lo que la carga última es de 1704 KN.

4.3 CASO Grupo de 2 Pilotes en Arcilla

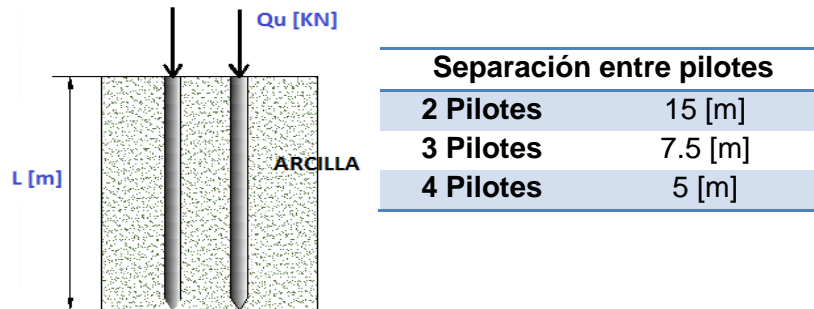
Tabla 2. Datos de los estratos para el análisis de grupo de pilotes.

ARENA		ARCILLA	
γ Sat [KN/m ³]	19	γ Sat [KN/m ³]	21
Φ [°]	34	Cu [KN/m ³]	80

Autores

La Tabla 2, contiene valores de los parámetros del suelo utilizados para evaluar la capacidad de carga del grupo de pilotes en el suelo granular y en el suelo arcilloso.

Figura 16. Ejemplo Caso Arcilla - Arena bajo Carga Vertical



Autores

CALCULO POR METODOS CONVENCIONALES

Para un grupo de pilotes de diámetro 0,7 m y longitud 6 m tenemos:

- **Arcilla no drenada:**

$$Q_u = A_p C_u N_c^* + \int_0^L \alpha^* C_u P \Delta L$$

Tenemos que $N_c^* = 9$

$$Q_p = 0.384 \text{ m}^2 * 80 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} * 9 = 277.008 \text{ KN}$$

$$\alpha^* = 0.21 + 0.25 \left(\frac{P_a}{C_u} \right) \leq 1$$

Donde P_a es la presión atmosférica= 101.3 KN/m²

$$\alpha^* = 0.21 + 0.25 \left(\frac{101.3 \text{ KN/m}^2}{80 \text{ KN/m}^2} \right) = 0.5265$$

$$Q_f = 2.199 \text{ m} * 6 \text{ m} * 80 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} * 0.5265 = 555.826 \text{ KN}$$

$$Q_u = 555.826 \text{ KN} + 277.008 \text{ KN} = \mathbf{832.914 \text{ KN}}$$

Calculamos la eficiencia del grupo de pilotes como:

$$E = 1 - \frac{\theta(n - 1)m + (m - 1)n}{90mn}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{D}{s} \text{ [grados]}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{0.7}{15} = 1.212 \text{ [grados]}$$

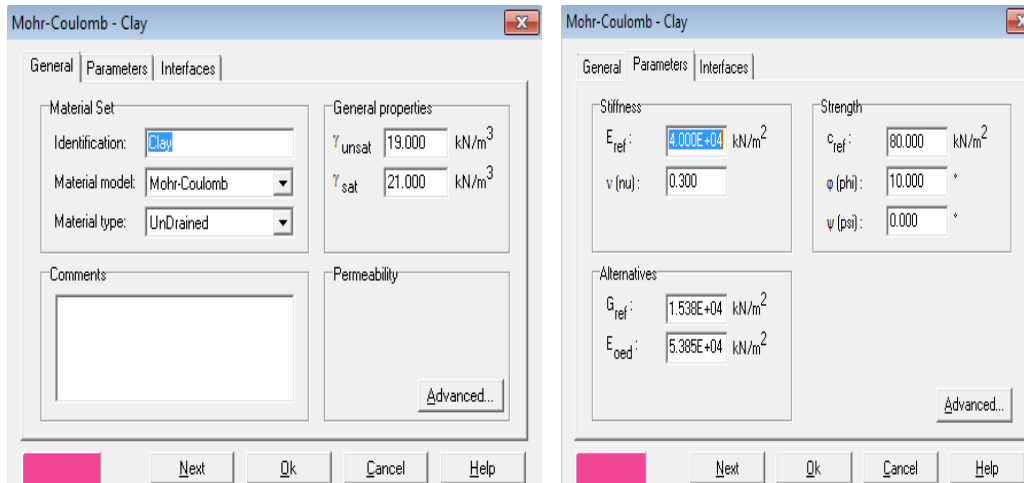
$$E = 1 - \frac{1.212(1 - 1)2 + (2 - 1)1}{90(2 * 1)} = 0.983$$

Como la Eficiencia es <1 entonces la capacidad del grupo de pilotes se calcula:

$$Q_{ug} = n * E \sum Q_u = 2 * 804.87 \text{ KN} * 0.983 = \mathbf{1638.06 \text{ KN}}$$

METODO NÚMÉRICO

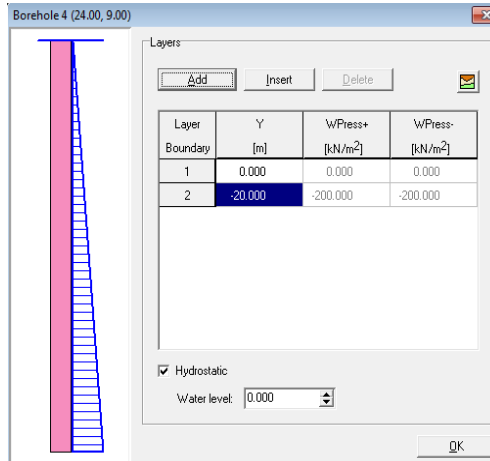
Figura 17. Parámetros del Suelo en Plaxis 3D



PLAXIS 3D

Modelación del perfil del Suelo:

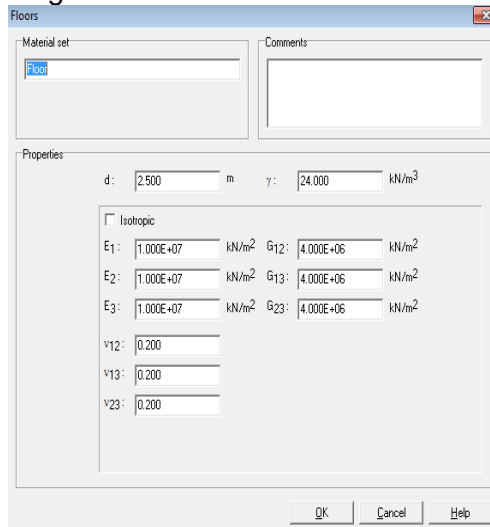
Figura 18. Perfil del Suelo.



PLAXIS 3D

Definición del material que va a conformar la losa que unirá a los pilotes (Viga Cabezal), su espesor y peso específico:

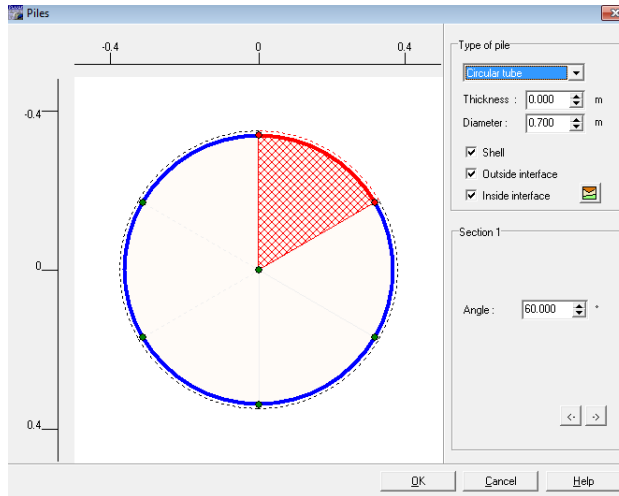
Figura 19. Definición de la Viga Cabezal.



PLAXIS 3D

Asignación de la sección transversal de los pilotes:

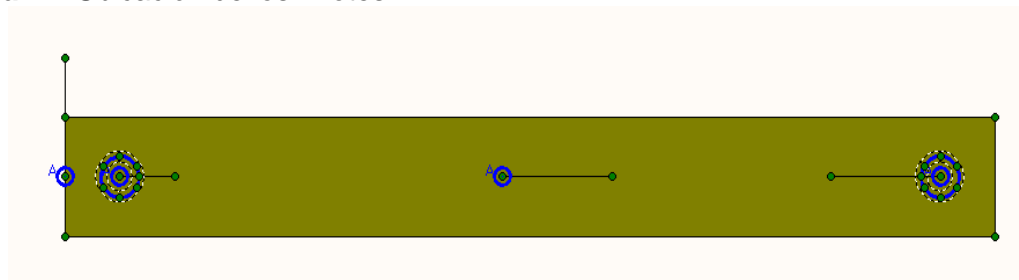
Figura 20. Sección Transversal del Pilote.



PLAXIS 3D

Dibujar la geometría y ubicar los pilotes:

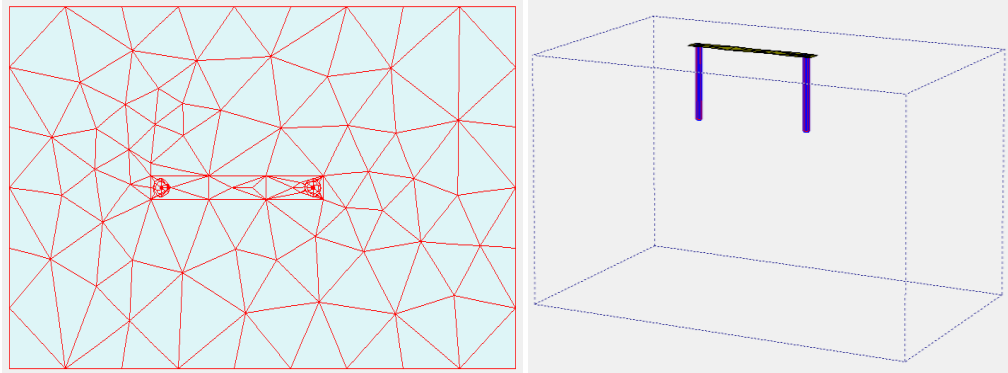
Figura 21. Ubicación de los Pilotes.



PLAXIS 3D

Después de deben generar las mallas para la implementación de la técnica de elementos finitos:

Figura 22. Técnica de Elementos Finitos.

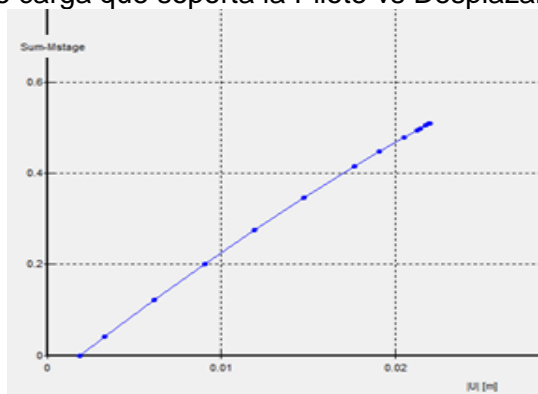


PLAXIS 3D

Etapa de cálculos: primero una fase de construcción y de carga del sistema.

En este caso se sometió a una carga de 15000 KN arrojando los siguientes resultados:

Figura 23. Porcentaje de carga que soporta la Pilote vs Desplazamiento



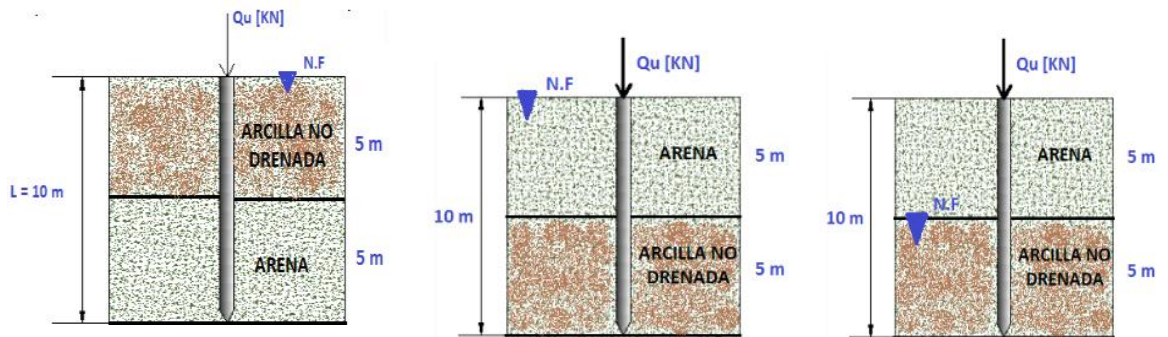
PLAXIS 3D

La carga soportada por el sistema antes de presentarse la falla, es decir la carga ultima se obtuvo mediante la grafica de carga vs deformación, que muestra el programa.

Se observa que soporto el 55.11% de la carga impuesta, es decir 7665 [KN]

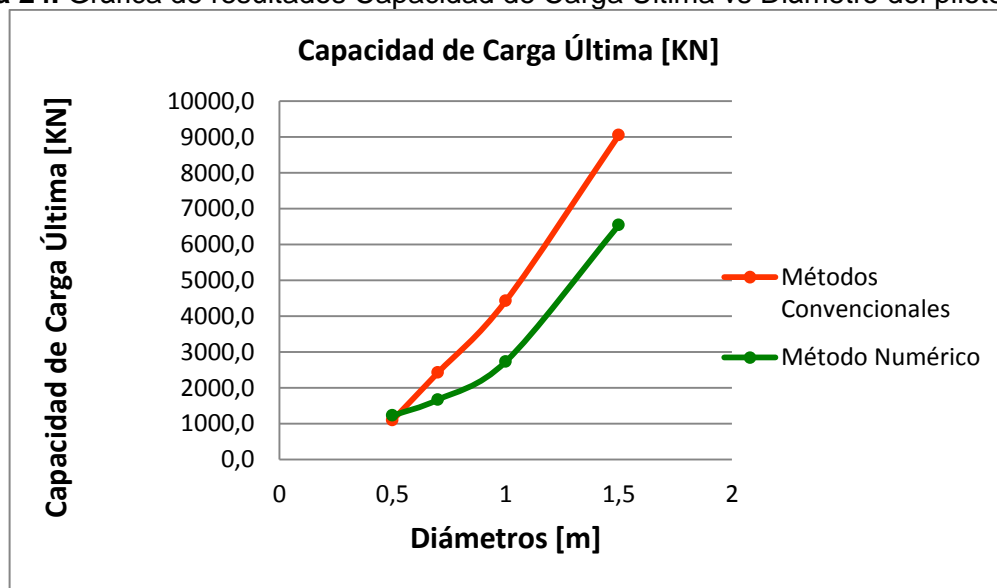
5. RESULTADOS

5.1 Pilote Individual bajo carga vertical



- Caso Arcilla – Arena (Saturado)

Figura 24. Gráfica de resultados Capacidad de Carga Última vs Diámetro del pilote.

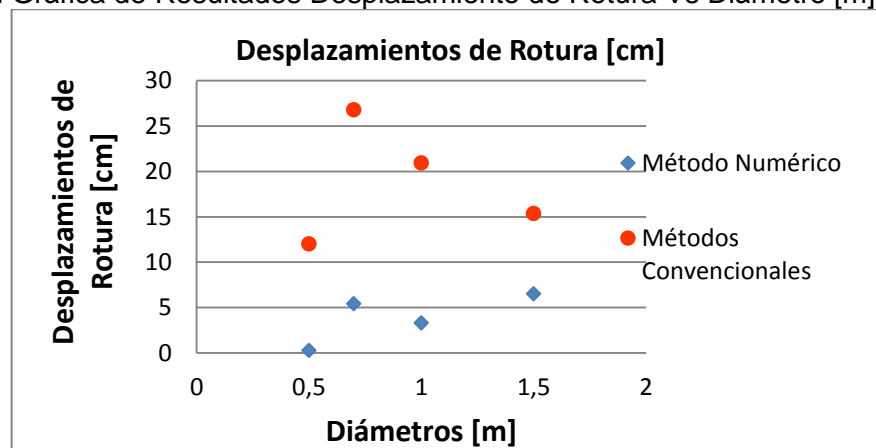


Autores

En la Figura 24 se observa que las capacidades de carga encontradas a partir de los metodos convencionales son mayores a los valores obtenidos en PLAXIS 3D; lo anterior se debe a que de acuerdo a una consulta realizada al equipo de soporte tecnico de PLAXIS 3D, el software considera que el método de instalación de los pilotes es pre-exacavado, mientras que las ecuaciones utilizadas en los métodos convencionales para el caso de las pilas se asemejan a las ecuaciones de capacidad de carga última de pilotes hincados, las cuales consideran que el angulo de fricción interna del suelo aumenta debido al sistema de instalación utilizado para la cimentación, ocasionando que la capacidad de carga ultima aumente considerablemente.

En la Figura 25 se muestran los desplazamientos que se obtienen cuando el pilote llega a su estado de falla, como se observa no es posible predecir su comportamiento ya que los resultados presentan una tendencia aleatoria.

Figura 25. Gráfica de Resultados Desplazamiento de Rotura Vs Diámetro [m]



Autores

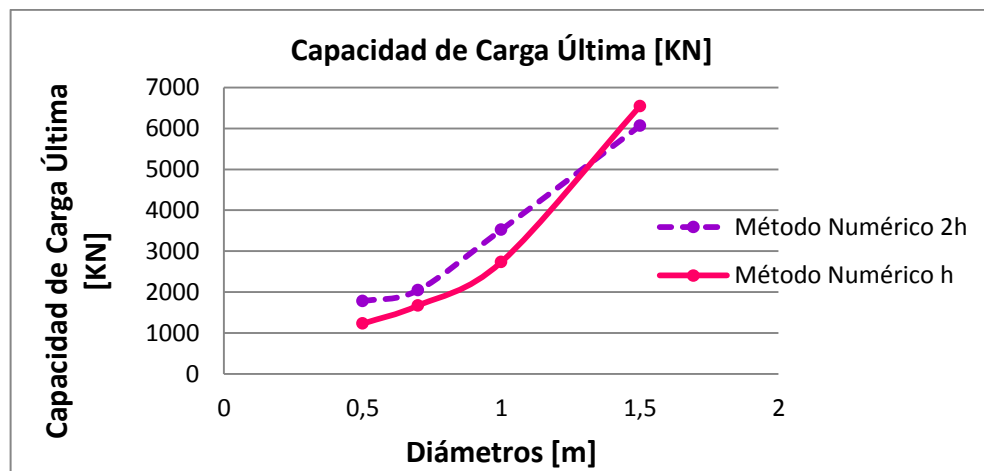
- **Condiciones de Borde en PLAXIS 3D**

A partir de la Figura 26 se quiere mostrar una de las desventajas que presenta el software en el modelamiento de las cimentaciones; ya que PLAXIS 3D permite considerar diferentes espesores de suelo bajo la punta del pilote, generando que la capacidad de carga última de éste sea función directa del espesor escogido.

Se realizaron modelaciones para el caso de pilote individual bajo la aplicación de carga vertical en estrato de suelo arcilla-arena en condiciones saturadas, variando el espesor del suelo que se encuentra bajo el pilote. Se consideró un espesor $h=10\text{m}$ y los resultados obtenidos que se muestran en la Figura 26, nos permiten concluir que la capacidad de carga última de los pilotes aumenta a medida que se incrementa la capa de suelo inferior.

Realmente esto es un problema numérico relacionado con la solución numérica de los programas que trabajan con elementos finitos, por lo tanto no se puede tomar como una variables aceptable; de hecho es un problema y vale la pena mencionarse que es una de las falencias de los programas. En este caso sin embargo la dispersión no es muy importante.

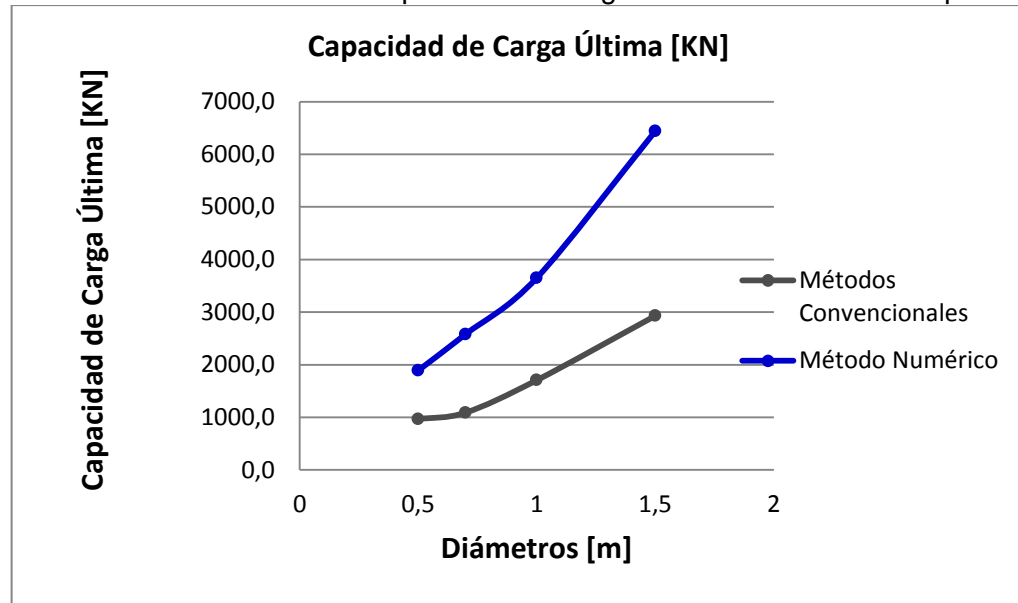
Figura 26. Condiciones de borde Plaxis 3D.



Autores

▪ **Caso Arena – Arcilla (Saturado)**

Figura 27. Gráfica de resultados Capacidad de Carga Última vs Diámetro del pilote.



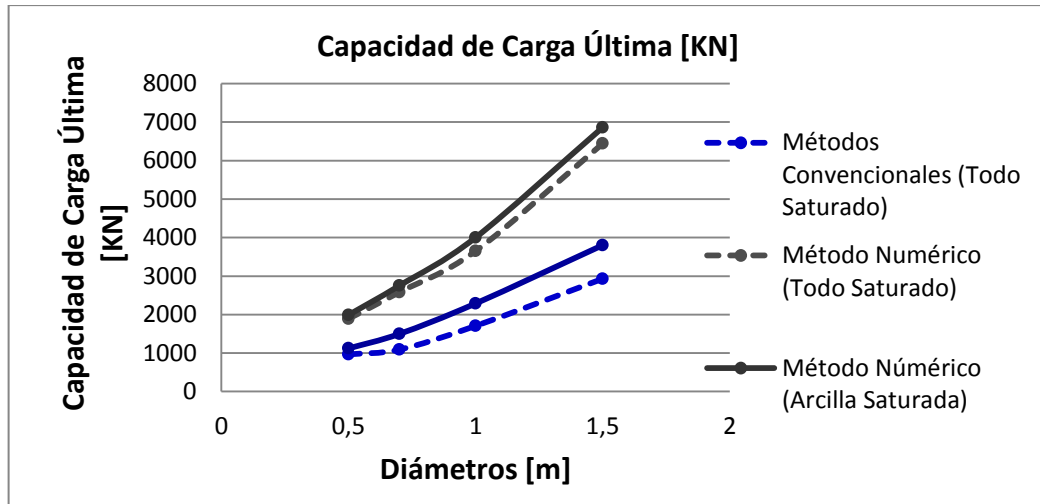
Autores

Para este caso los resultados obtenidos permiten inferir que la disminución de la capacidad de carga última de los pilotes calculada a partir de los métodos convencionales, se debe a que el suelo arcilloso aporta capacidad de carga por fricción y punta, siendo esta última castigada severamente por los métodos convencionales, al utilizar factores de carga muy bajos, que ocasionan una disminución importante en su capacidad de carga a diferencia de la obtenida por el software; por tanto en este caso los métodos convencionales son mas conservadores que el método numérico

Lo anterior nos permite poner en discusión si los métodos convencionales son conservativos, a lo que se espera sea el comportamiento real del sistema suelo-pilote.

▪ Caso Arena- Arcilla Saturada

Figura 28. Análisis de la Influencia del Nivel Freático.

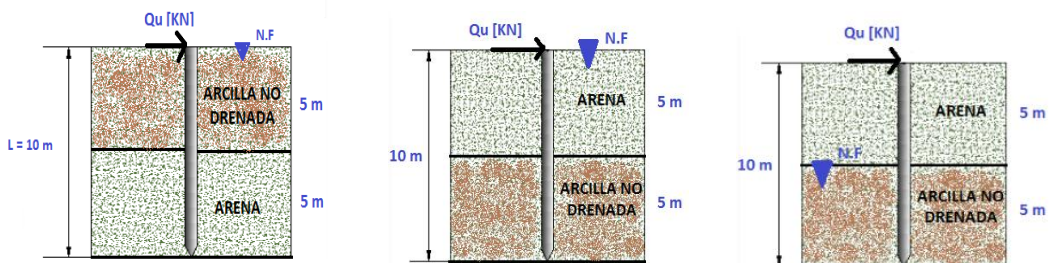


Autores

Con la intención de analizar la influencia que tiene la ubicación del nivel freático en un estrato de suelo, se realizó un nuevo escenario en el cual solo la arcilla se encontraba en condiciones saturadas y se comparó con el caso anterior, en el cual todas las capas de suelo se encontraban saturadas.

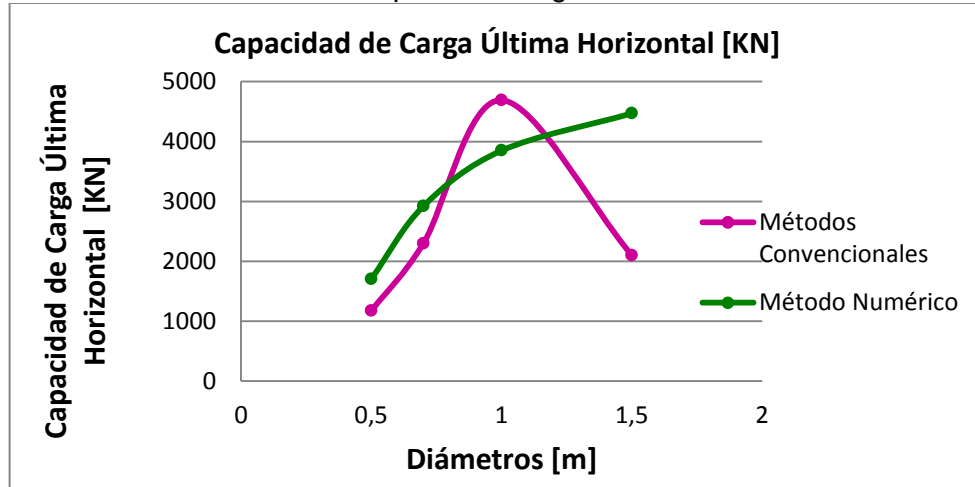
Como se observa el comportamiento que se muestra en la Figura 28 indica que la condición hidráulica más crítica se obtiene cuando el suelo se encuentra bajo condiciones saturadas, es decir, que su capacidad de carga última disminuye.

5.2 Pilote Individual Bajo Carga Horizontal



▪ **Caso Arcilla – Arena (Todo Saturado)**

Figura 29. Gráfica de Resultados Capacidad Carga Horizontal Última Vs Diámetro.



Autores

En primera instancia es necesario resaltar que los métodos convencionales para calcular la capacidad de carga última horizontal presentan una limitante importante, ya que no permiten considerar la heterogeneidad del terreno.

En la Figura 29, que se obtuvo a partir de los métodos convencionales se observa un cambio significativo de la capacidad de carga a partir de diámetros mayores a un metro; esto se debe a que la aplicación de estos métodos es controlada por la esbeltez del pilote.

Mediante los resultados obtenidos podemos notar que durante el proceso de implementación de estos métodos, los autores establecieron un parámetro de control (relación L/D) para evitar seguir sobrestimando la capacidad de carga del pilote, sin embargo se observa que al considerar una relación $L/D < 10$ el método subestima significativamente la capacidad de carga del pilote.

Por otra parte el método numérico muestra un aumento en la capacidad de carga a medida que aumenta la sección del pilote, así mismo se infiere que este

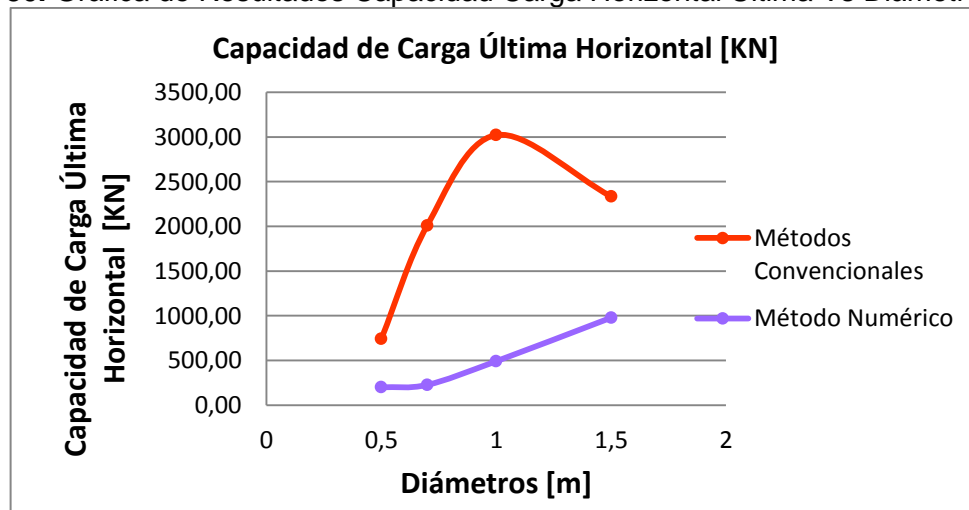
comportamiento presenta una tendencia asintótica, que nos lleva a predecir que para diámetros mayores a 2 metros la capacidad de carga horizontal de la pila no aumentará significativamente. Por tanto en este caso el método numérico ofrece un mayor acercamiento al comportamiento real del sistema suelo pilote.

▪ **Caso Arena – Arcilla (Saturado)**

Se observa en la Figura 30, que las curvas para este caso tienen la misma tendencia que en la situación anterior, ratificando que el método convencional no es el más apropiado para evaluar la capacidad de carga horizontal, debido a que no considera el efecto que aporta el estrato inferior del suelo a la capacidad de carga.

Por otra parte es notoria la variación en la capacidad de carga horizontal del pilote al cambiar de posición los estratos analizados mediante el método numérico, siendo mayor el valor encontrado con el suelo arcilloso como estrato superior.

Figura 30. Gráfica de Resultados Capacidad Carga Horizontal Última Vs Diámetro.



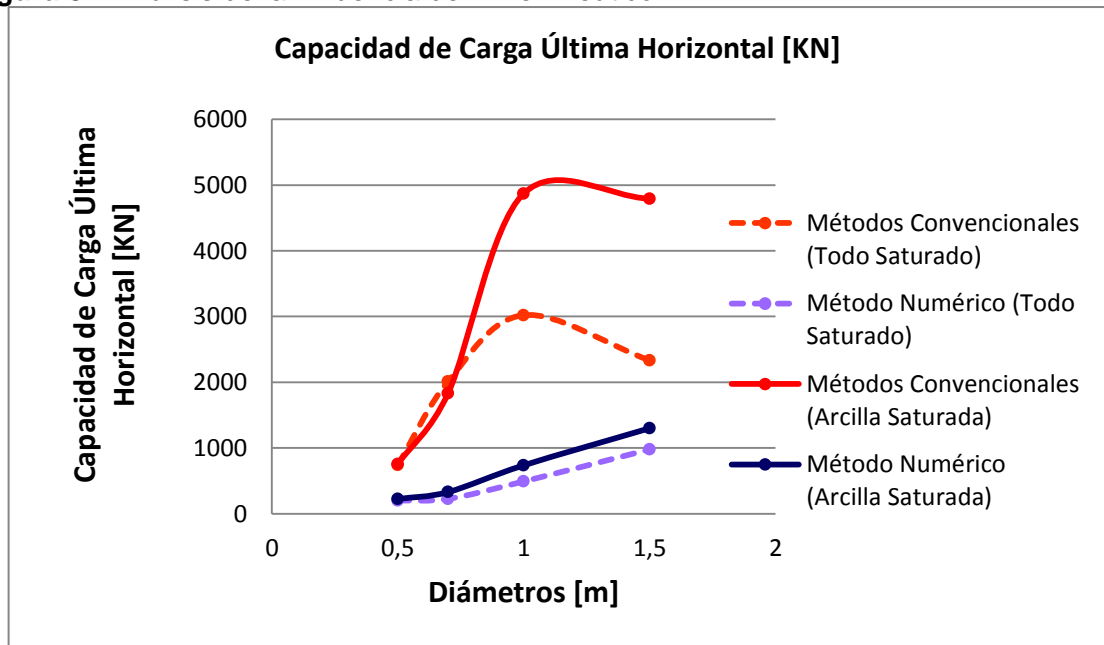
Autores

▪ **Caso Arena- Arcilla (Saturada)**

Pese a la incertidumbre que presentan los métodos convencionales para el cálculo de la capacidad de carga horizontal, en la Figura 31 se observa el comportamiento esperado para las condiciones hidráulicas propuestas, no obstante estos valores siguen presentando magnitudes muy elevadas.

Por su parte el método numérico sigue el comportamiento previsto para las condiciones de saturación analizadas mostrando que el caso más crítico se presenta cuando todo el perfil del suelo se encuentra con el nivel freático en la superficie del terreno.

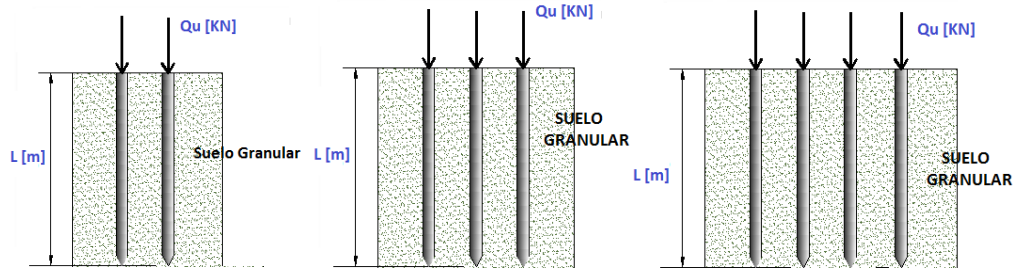
Figura 31. Análisis de la Influencia del Nivel Freático.



Autores

5.3 Grupo de pilotes Bajo Carga Vertical

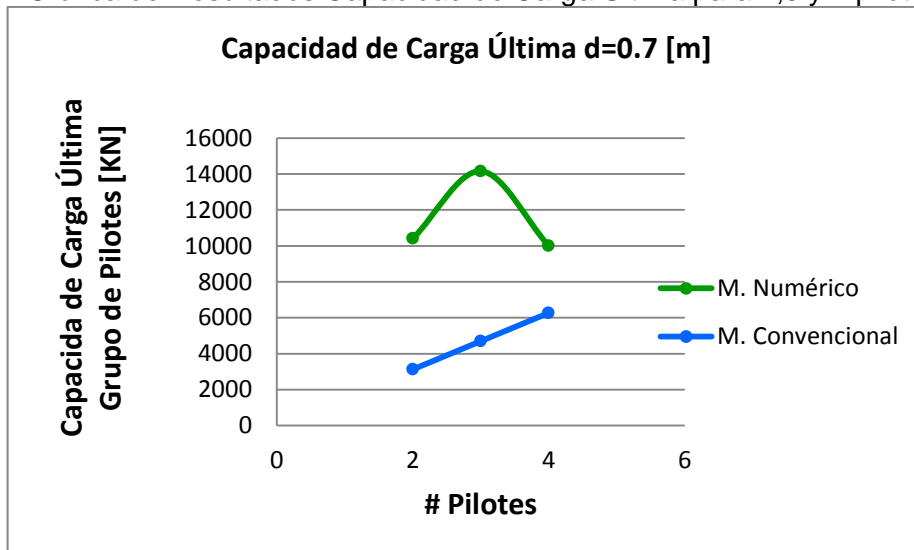
Arena



- Longitud =6 m Diámetro= 0.7 m

A primera vista a partir de la Figura 32, se observa que la capacidad de carga última del grupo de pilotes obtenida a partir de los métodos convencionales es bastante conservativa en comparación a los valores encontrados en PLAXIS 3D.

Figura 32. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última para 2,3 y 4 pilotes. $d=0.7\text{m}$



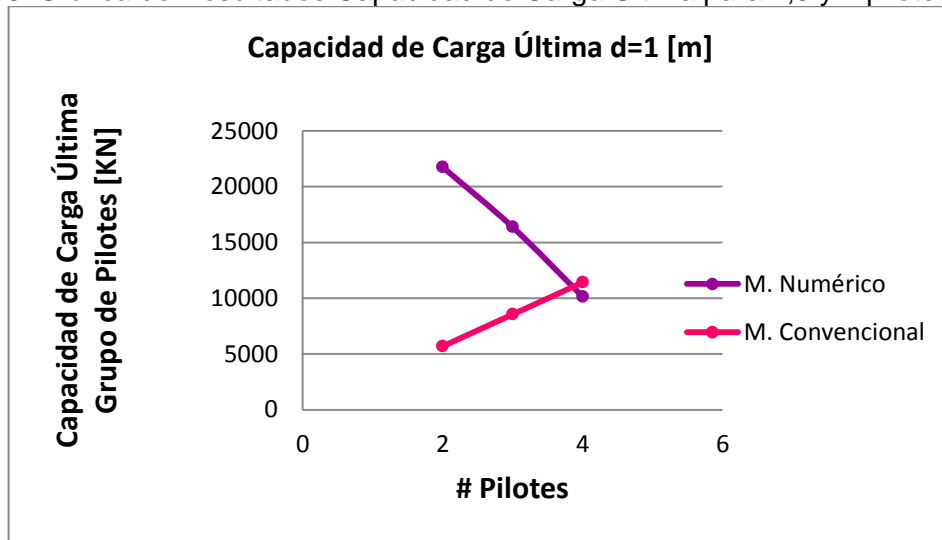
Autores

De igual forma se observa que el comportamiento de los valores de capacidad de carga obtenidos mediante los métodos convencionales presentan forma lineal, a diferencia de la tendencia que presentan los valores obtenidos en PLAXIS 3D; este comportamiento en forma de campana de Gauss se puede explicar al considerar la distribución de esfuerzos que se generan alrededor de los pilotes bajo la aplicación de la carga impuesta. Al analizar este comportamiento se percibe un incremento en la capacidad de carga al utilizar de 2 a 3 pilotes; esto se debe a que los pilotes cuentan con suficiente separación entre ejes y su sección transversal no es muy grande, lo que permite que los pilotes trabajen de manera individual y no se genere una superposición de esfuerzos.

Por otra parte al aumentar el número de pilotes, la separación entre ellos disminuye ocasionando una superposición de esfuerzos que genera una reducción en la capacidad de carga del grupo de pilotes.

- Longitud =6 m Diámetro= 1 m

Figura 33. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última para 2,3 y 4 pilotes. D=1m



Autores

La Figura 33 nos muestra que la capacidad de carga del grupo de pilotes obtenida a partir de PLAXIS 3D es mucho mayor a la calculada utilizando los métodos convencionales para 2 y 3 pilotes, adicionalmente se observa que al utilizar 4 pilotes existe cierta similitud en los resultados obtenidos.

A diferencia del caso anterior la curva generada por los valores del método numérico no presenta una apariencia de campana sino una forma lineal descendente; lo anterior se debe a que la sección del pilote aumenta considerablemente lo que hace que no exista suficiente separación entre pilotes y se genere una superposición de esfuerzos que disminuye notablemente la capacidad de carga del grupo.

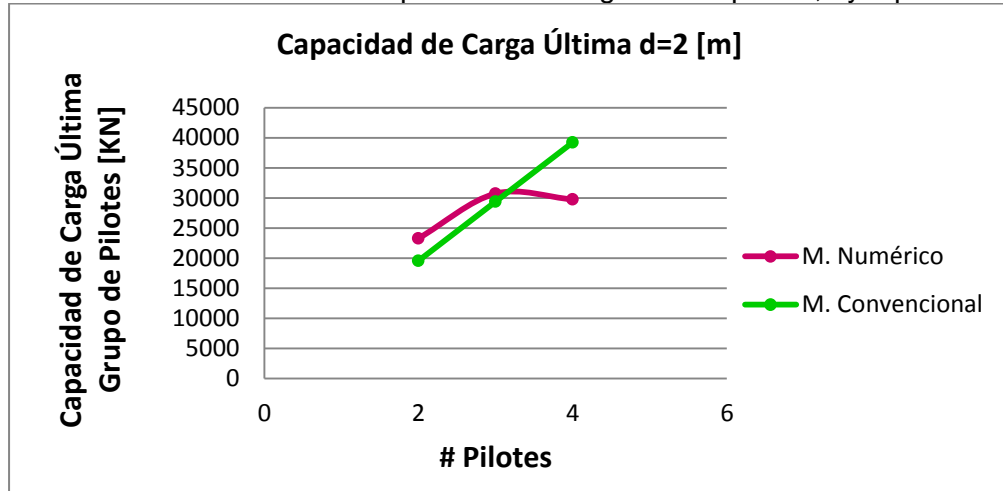
- **Longitud =6 m Diámetro= 2 m**

Para esta condición los valores obtenidos mediante los dos métodos presentan cierta similitud al utilizar 2 y 3 pilotes, sin embargo se advierte que para 4 pilotes la capacidad de carga calculada por el método convencional es mayor que la encontrada en PLAXIS 3D.

La gráfica correspondiente al método numérico presenta nuevamente una forma de campana; esto se debe a que a pesar de que la sección del pilote es lo suficientemente, para que se genere poca separación entre ellos y se presente una superposición de esfuerzos, lo es también para soportar una mayor capacidad de carga al incrementar el número de pilotes de 2 a 3.

No obstante al aumentar el número de pilotes a 4 predomina la superposición de esfuerzos generada alrededor de los pilotes, debida a la poca separación que existe entre ellos, dando como resultado la disminución de la capacidad de carga del grupo.

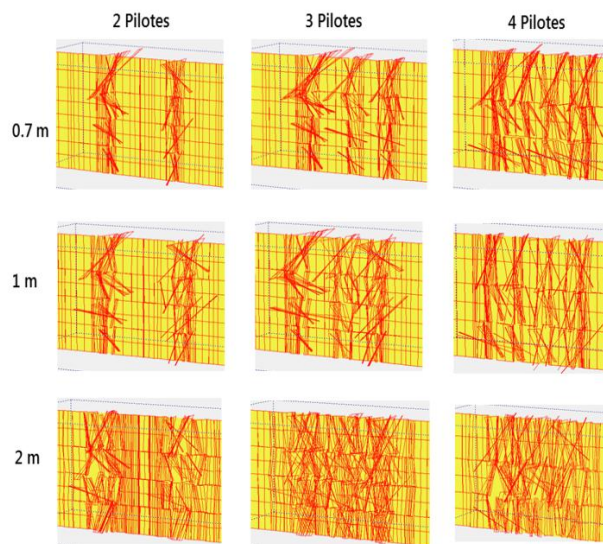
Figura 34. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última para 2,3 y 4 pilotes. d=2m



Autores

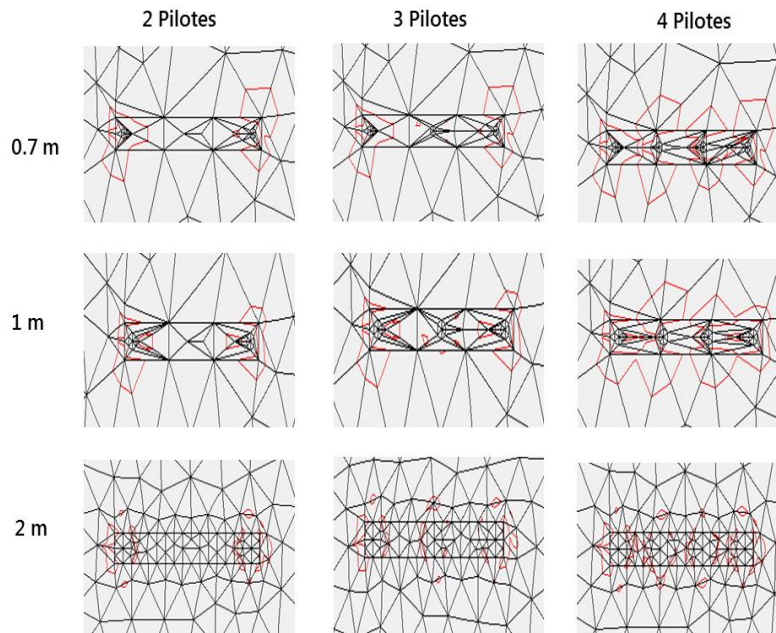
PLAXIS 3D, permite observar desde diferentes vistas (planta y perfil) la distribución de esfuerzos totales y cortantes que se generan en el suelo por la aplicación de la carga en los pilotes. En las siguientes figuras se muestra este comportamiento.

Figura 35. Distribución de Esfuerzos Cortantes. Vista en Perfil Arena L=6m



PLAXIS 3D

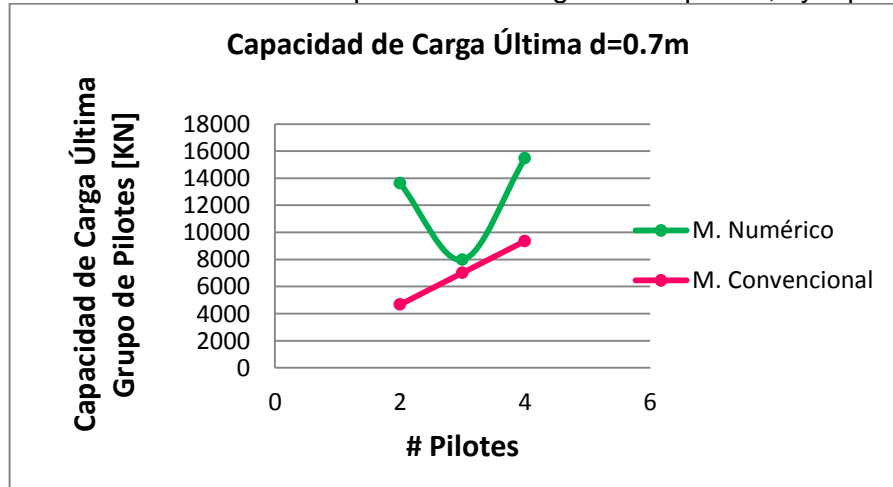
Figura 36. Distribución de Esfuerzos Totales. Vista en Planta. Arena L=6m



Autores

- Longitud =8 m Diámetro= 0.7 m

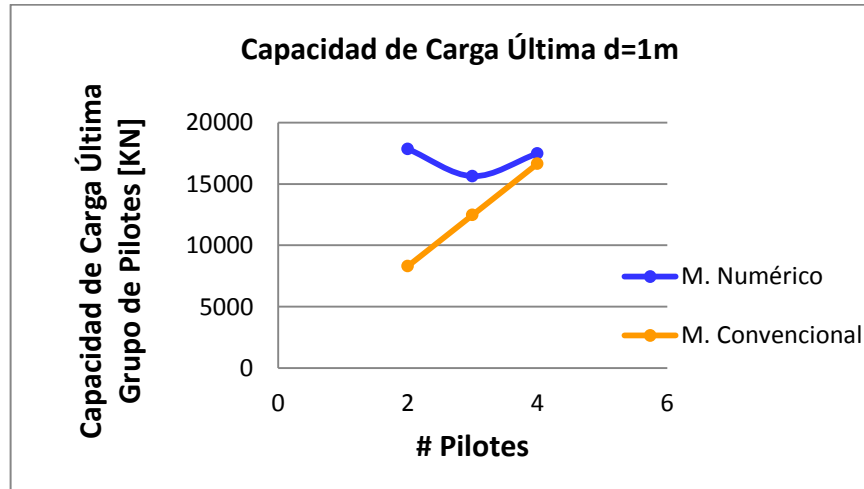
Figura 37. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última para 2,3 y 4 pilotes. d=0.7m



Autores

- Longitud =8 m Diámetro= 1 m

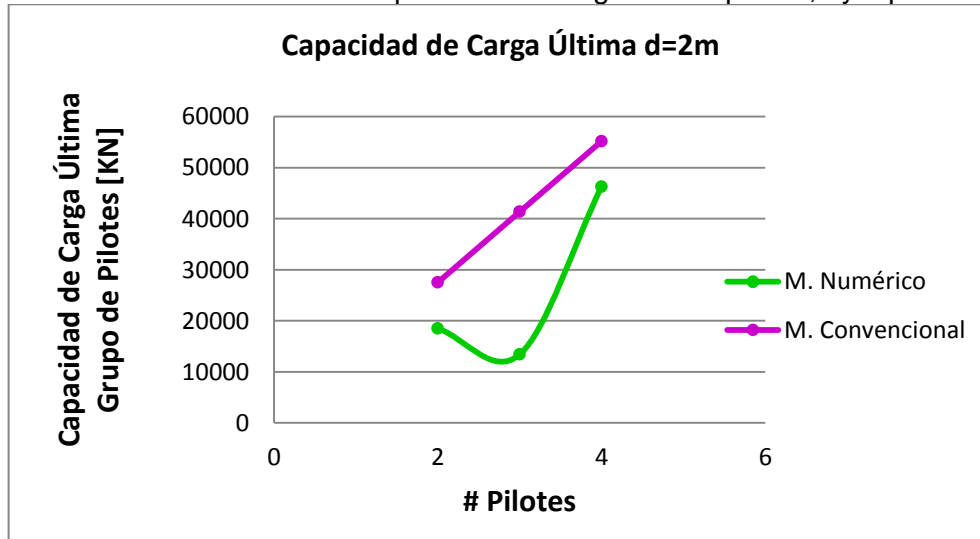
Figura 38. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última para 2,3 y 4 pilotes. d=1m



Autores

- Longitud =8 m Diámetro= 2 m

Figura 39. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última para 2,3 y 4 pilotes. d=2m

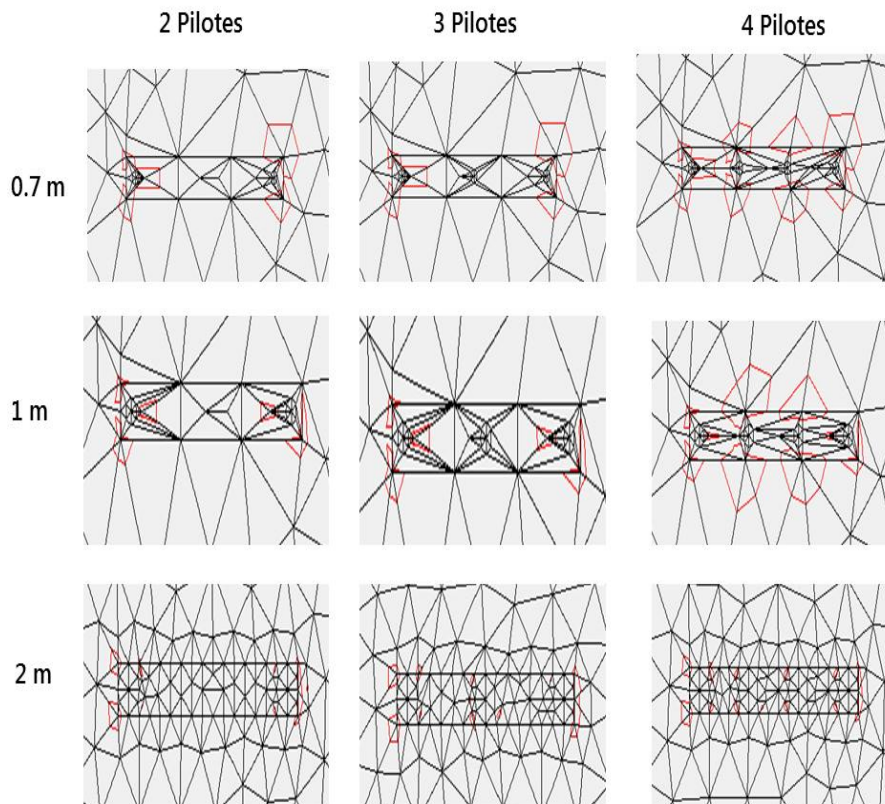


Autores

Los resultados obtenidos a partir del método numérico para el caso en el que la longitud del pilote es de 8 m, nos muestran una tendencia en la que la concavidad de la curva difiere a la obtenida en el caso anterior cuando la longitud del pilote era de 6m, muy posiblemente este cambio en su curvatura se deba al aumento de la longitud del pilote en la cual se presentan la superposición de esfuerzos.

En la Figura 40 que se presenta a continuación, se muestra las zonas alrededor de los pilotes que se ven afectadas por los esfuerzos totales que se generan al utilizar diferente número de pilotes en un suelo granular.

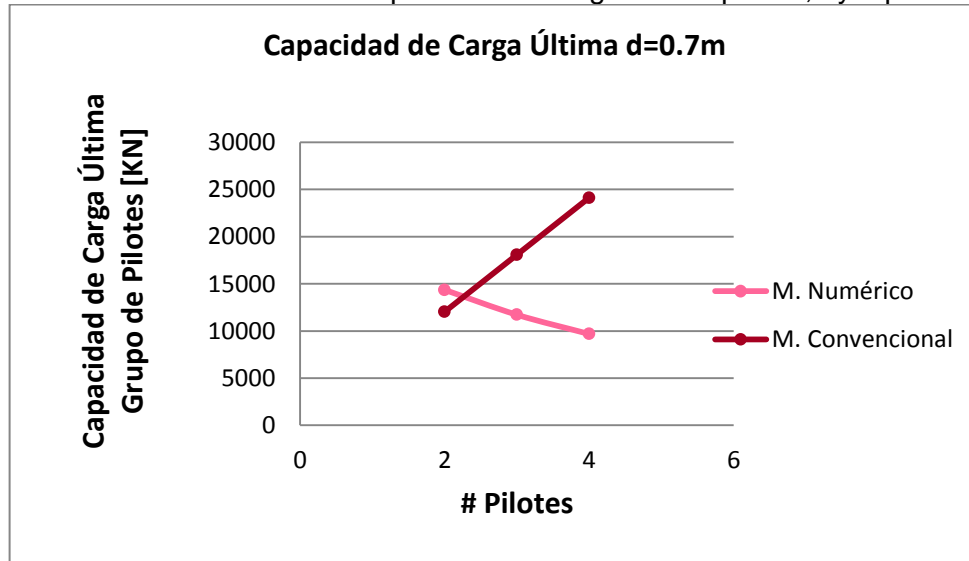
Figura 40. Distribución de Esfuerzos Totales en Arena. Vista en Planta. Arena L=8m



Autores

- Longitud = 15 m Diámetro =0.7 m

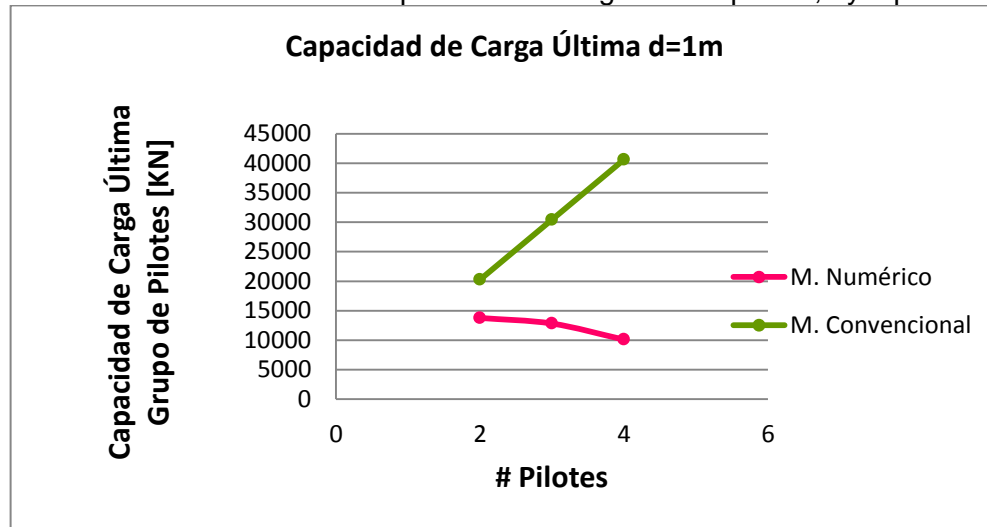
Figura 41. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última para 2,3 y 4 pilotes. d=0.7m



Autores

- Longitud = 15 m Diámetro =1 m

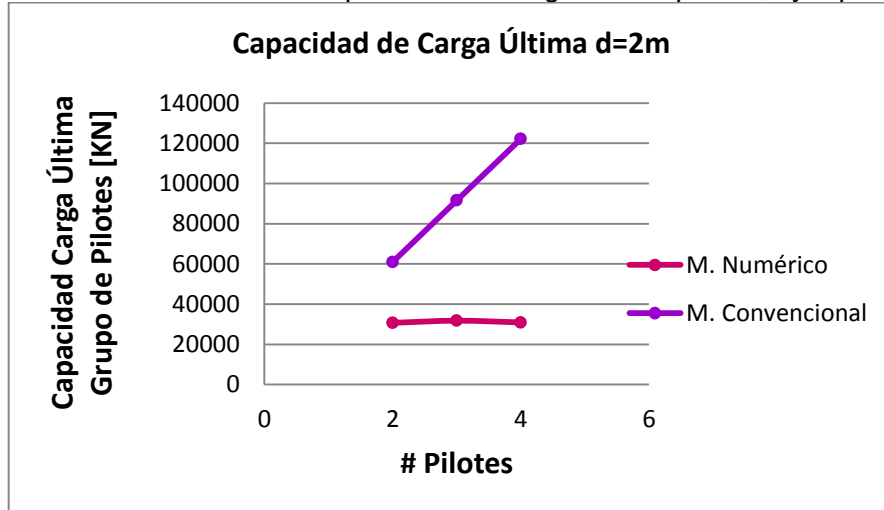
Figura 42. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última para 2,3 y 4 pilotes. d=1m



Autores

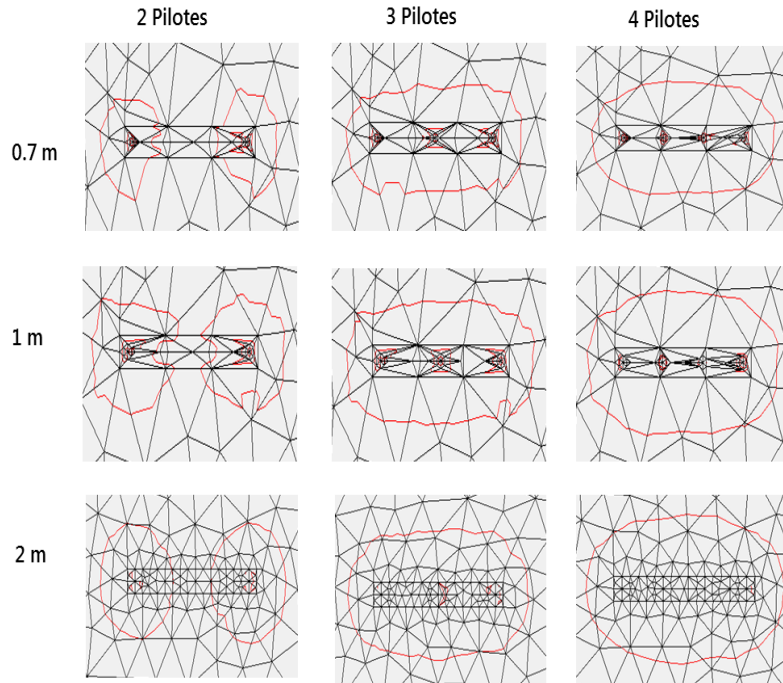
- Longitud = 15 m Diámetro = 2 m

Figura 43. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última para 2,3 y 4 pilotes. d=2m



Autores

Figura 44. Distribución de Esfuerzos Totales. Vista en Planta. Arena L=15m

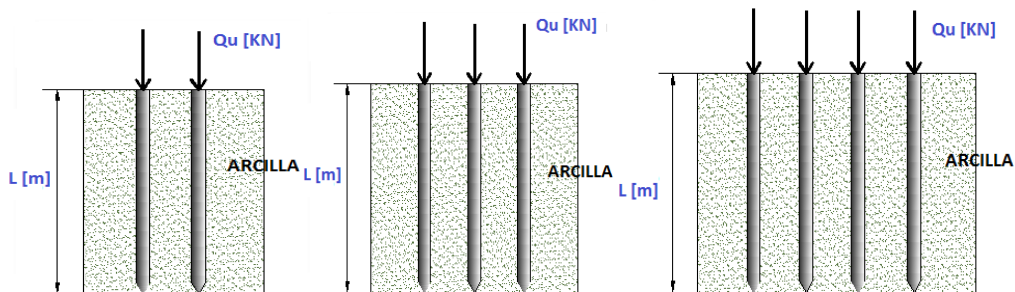


PLAXIS 3D

La longitud del pilote al igual que la generación de esfuerzos alrededor de los pilotes, son factores importantes a considerar en la obtención de los valores de capacidad de carga a partir del método numérico; ya que por los resultados que se tienen permite inferir que disminuyen la capacidad de carga puede resistir la fundación. A partir de las Figuras 41,42 y 43 se observa que para estas condiciones de longitud, el incremento en el número de pilotes no aporta un aumento considerable a la resistencia de la cimentación.

Debido a la heterogeneidad del comportamiento de los valores obtenidos bajo las diferentes condiciones analizadas para el grupo de pilotes en suelo granular, no es posible establecer un comportamiento específico de la capacidad de carga.

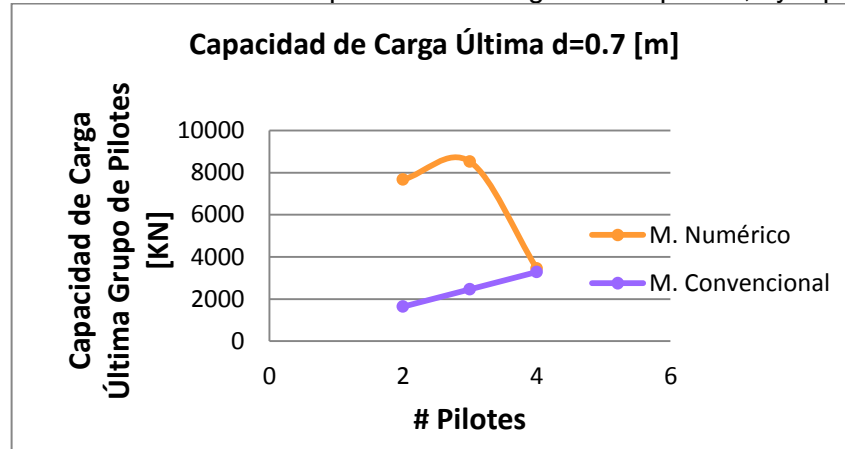
Arcilla



- **Longitud =6 m Diámetro= 0.7m**

Para estas condiciones de suelo arcilloso se presenta cierta similitud en el comportamiento de la curva de capacidad de carga obtenida por los métodos numéricos con la gráfica encontrada para el suelo granular. Sin embargo se puede inferir que la superposición de esfuerzos afecta de manera más significativa a este tipo de suelo, ya que la capacidad para un grupo de 4 pilotes disminuye drásticamente llegando a ser muy similar al valor obtenido por el método convencional.

Figura 45. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última para 2,3 y 4 pilotes. $d=0.7\text{m}$

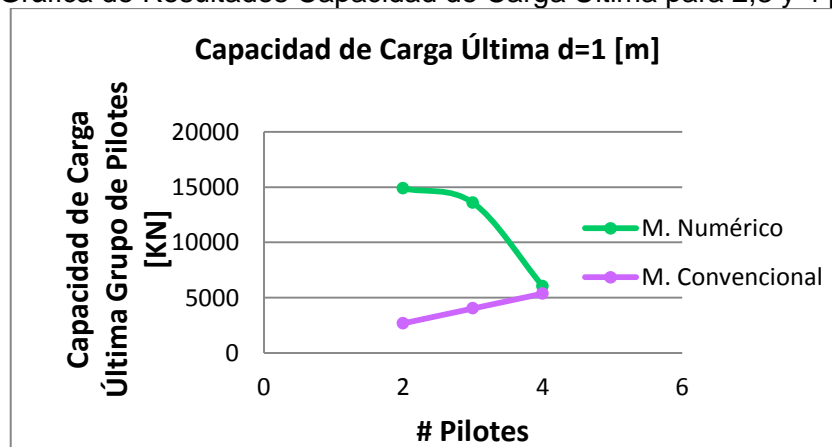


Autores

- **Longitud =6 m Diámetro= 1m**

A diferencia de la gráfica anterior es necesario resaltar que no se presenta un incremento en la capacidad de carga al utilizar de 2 a 3 pilotes, debido a que la sección del pilote aumenta y hace que la separación entre ellos se reduzca y produzca que los esfuerzos se sobrepongan y por ende su capacidad de carga disminuya.

Figura 46. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última para 2,3 y 4 pilotes. $d=1\text{m}$

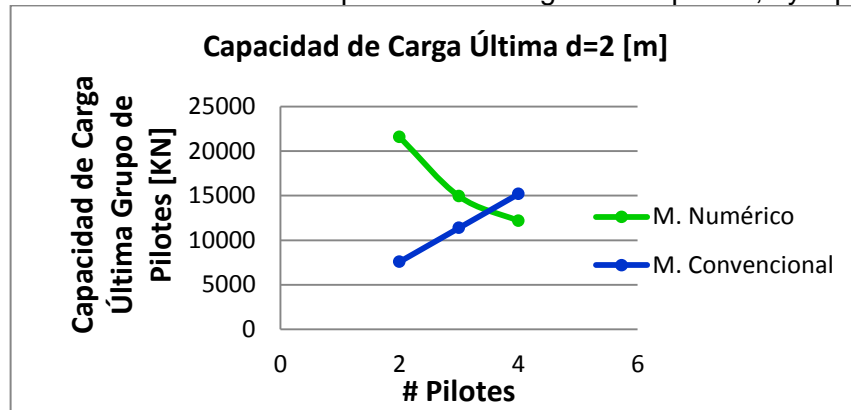


Autores

- Longitud =6 m Diámetro= 2 m

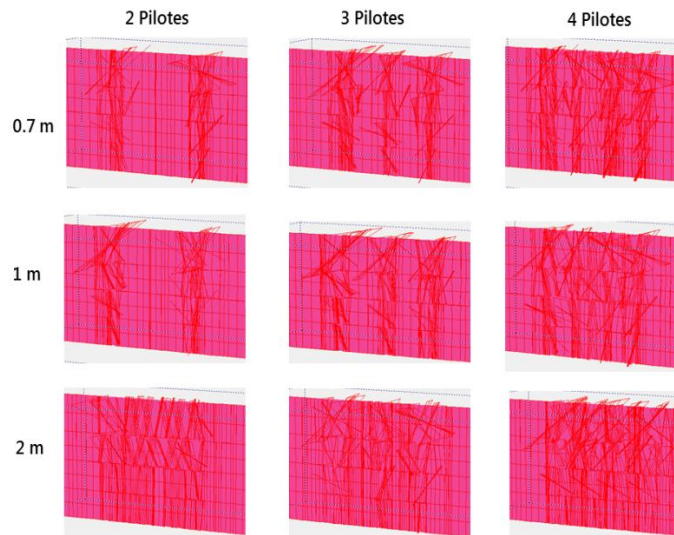
A partir de la Figura 47 se puede ratificar que el suelo arcilloso es más susceptible a la superposición de esfuerzos que el suelo granular, lo que hace que su capacidad disminuya al aumentar el número de pilotes utilizado; sin importar que su sección sea de gran tamaño.

Figura 47. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última para 2,3 y 4 pilotes. d=2m



Autores

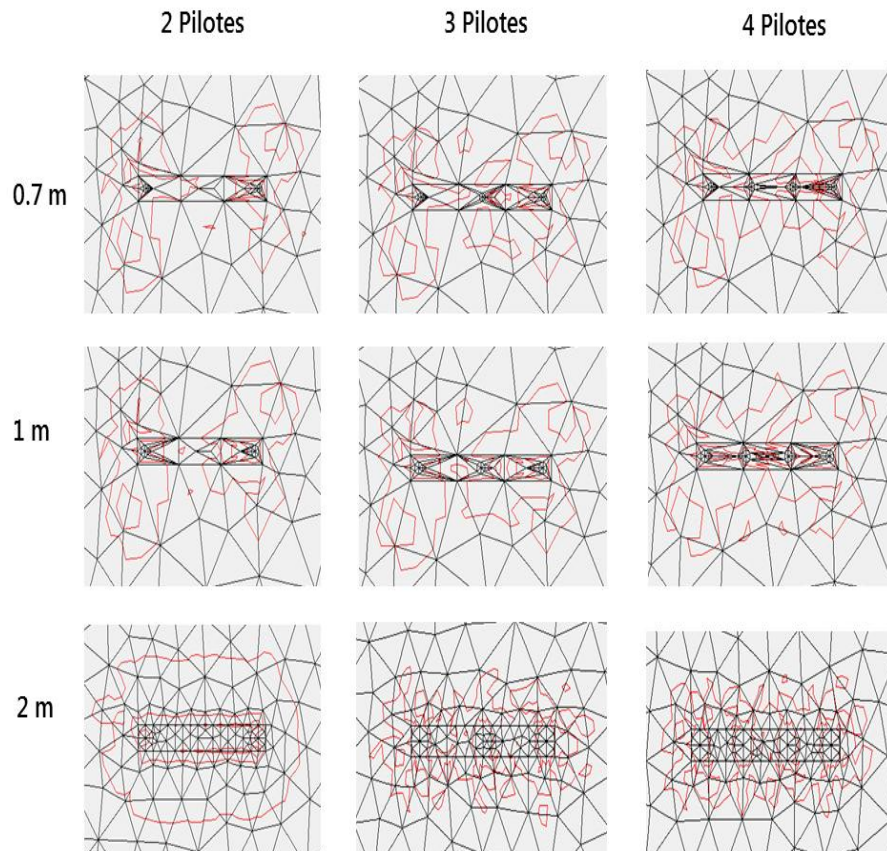
Figura 48. Distribución de Esfuerzos Cortantes Plaxis 3D. Vista en Perfil .Arcilla L=6m.



PLAXIS 3D

En las Figuras 48 y 49 se presentan los esfuerzos cortantes totales generados alrededor de los pilotes y las situaciones en las cuales se observa la superposición de esfuerzos, para un suelo arcilloso, utilizando diferentes diámetros con longitud 6 m de los pilotes.

Figura 49. Distribución de Esfuerzos Totales Plaxis 3D. Vista en Planta. Arcilla L=6m



PLAXIS 3D

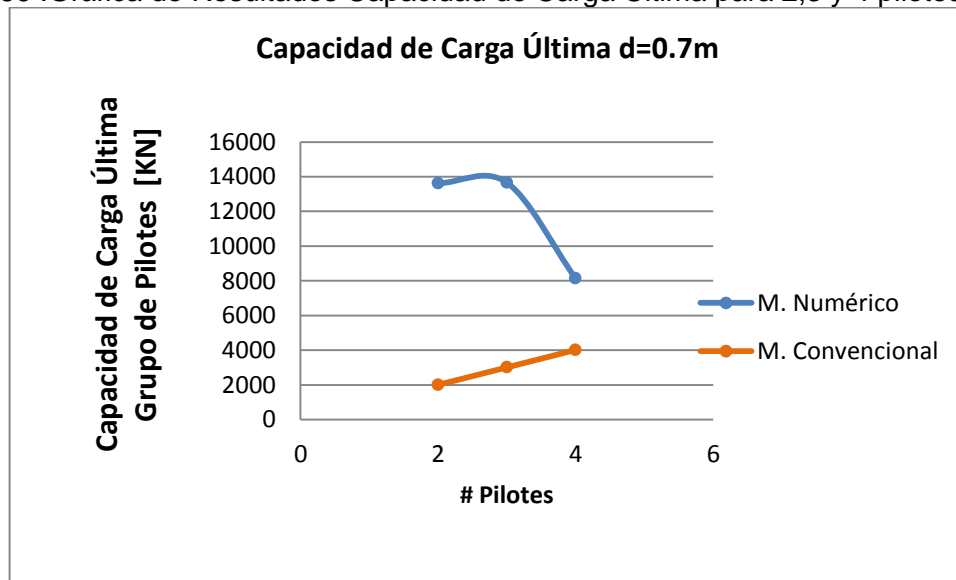
El comportamiento que se observa para los valores que se obtienen a partir del método numérico para los diferentes diámetros es muy similar (Figuras 50, 51 y 52); posiblemente la disminución de la capacidad de carga al aumentar el número de pilotes, igualmente a lo sucedido en el suelo granular para una longitud de 8

metros, se deba al aumento en la longitud del pilote en la cual se presentan sobreesfuerzos.

Sin embargo a diferencia de lo observado en el suelo arenoso, se puede inferir que las propiedades de resistencia de la arcilla afectan considerablemente la capacidad de carga de los pilotes.

- Longitud =8m Diámetro=0.7m

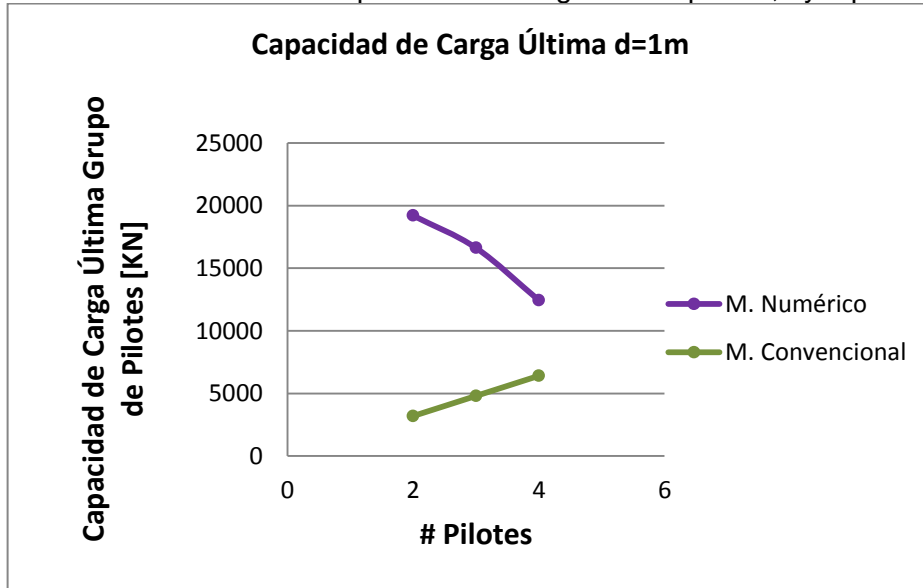
Figura 50 .Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última para 2,3 y 4 pilotes. d=0.7m



Autores

- Longitud =8m Diámetro=1m

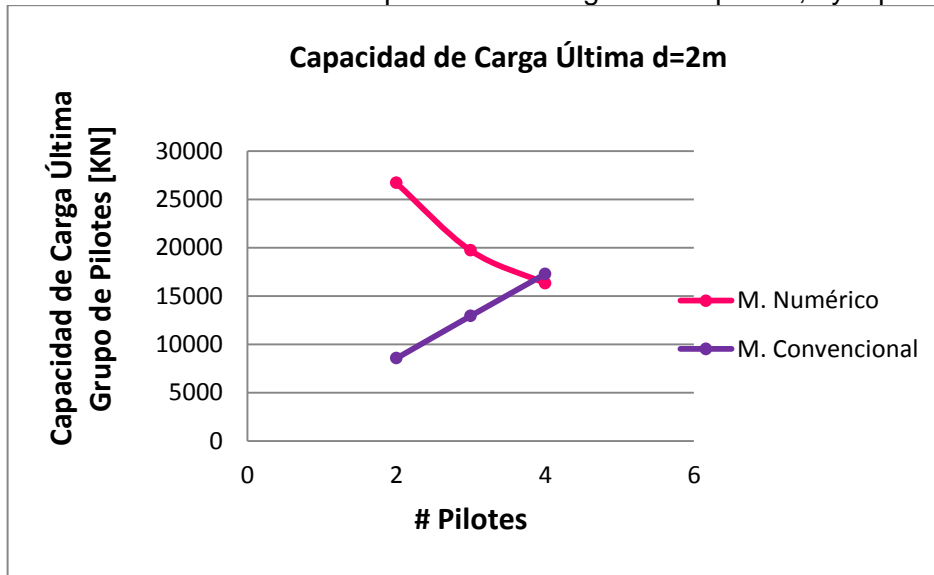
Figura 51. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última para 2,3 y 4 pilotes. $d=1\text{m}$



Autores

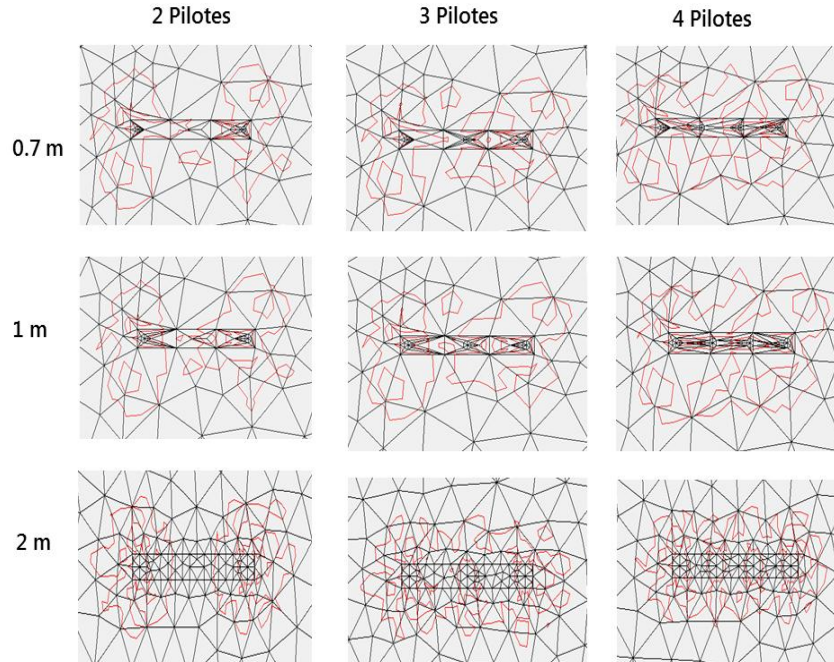
- Longitud =8m Diámetro=2m

Figura 52 .Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última para 2,3 y 4 pilotes. $d=2\text{m}$



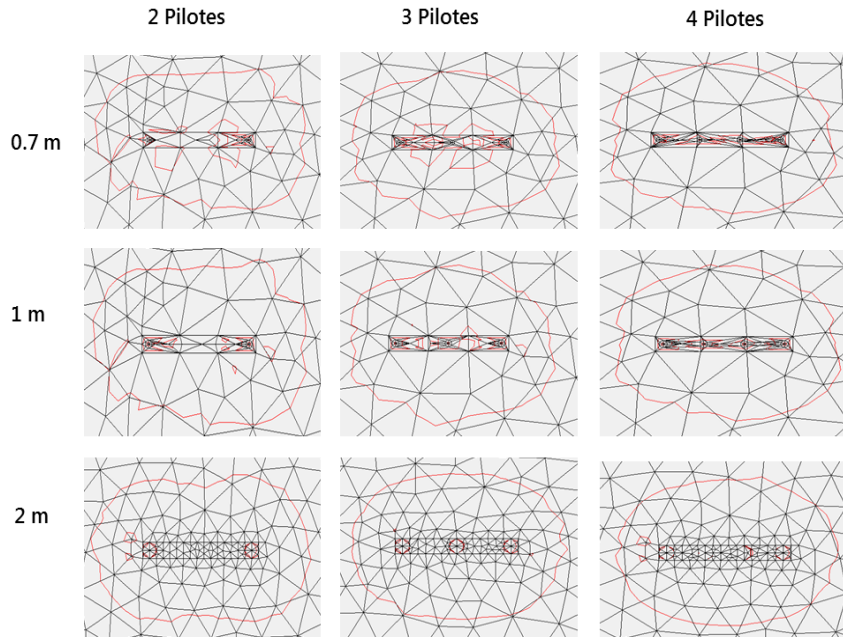
Autores

Figura 53. Distribución de Esfuerzos Totales. Vista en Planta. Arcilla L=8m



PLAXIS 3D

Figura 54. Distribución de Esfuerzos Totales. Vista en Planta. Arcilla L=15m



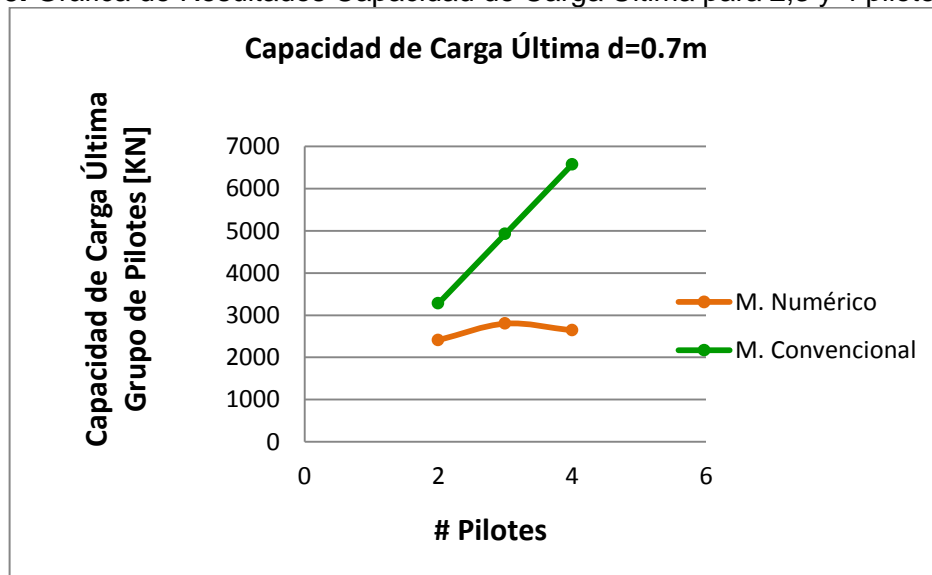
PLAXIS 3D

De las gráficas anteriores se observa que la zona de afectación por los esfuerzos totales es mucho mayor a medida que se aumenta la longitud del pilotes y en comparación a los esfuerzos generados en el suelo granular es evidente que para el suelo arcilloso éstos son más grandes.

En las dos gráficas que se presentan a continuación, Figura 55 y 56 se observa el comportamiento en forma de campana de gauss. Así mismo es necesario resaltar que el cambio que se presenta al utilizar diferentes números de pilotes es menos pronunciado, que lo obtenido para longitudes menores.

- Longitud =15 m Diámetro=0.7m

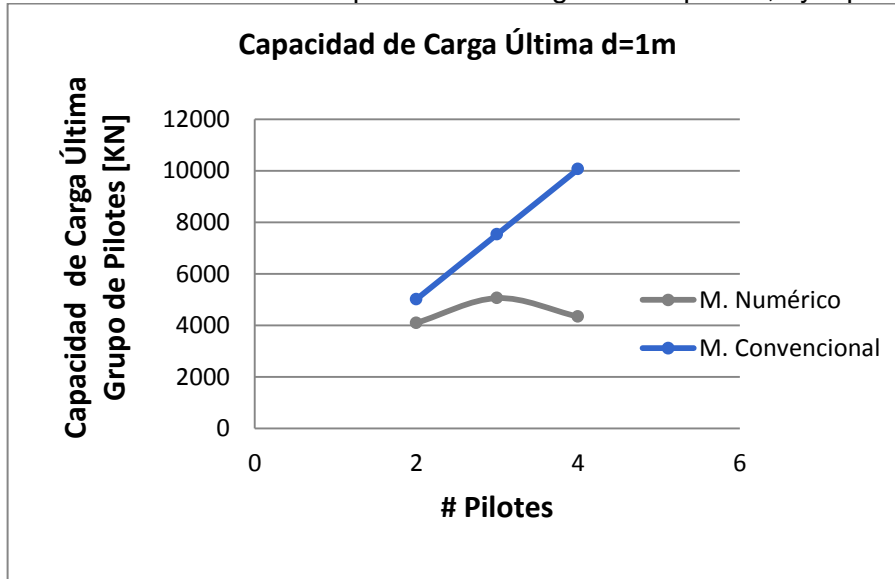
Figura 55. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última para 2,3 y 4 pilotes. d=0.7m



Autores

- Longitud =15 m Diámetro=1 m

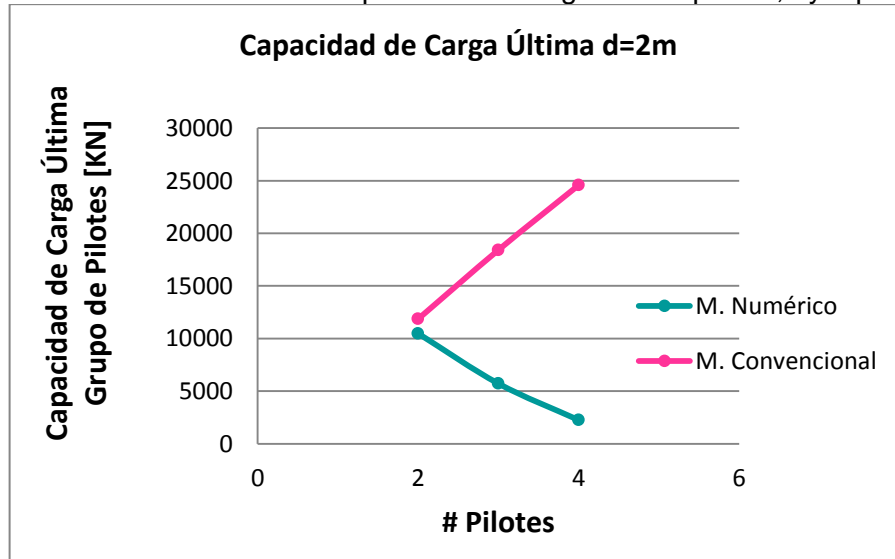
Figura 56. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última para 2,3 y 4 pilotes. $d=1\text{m}$



Autores

- Longitud =15 m Diámetro=2 m

Figura 57. Gráfica de Resultados Capacidad de Carga Última para 2,3 y 4 pilotes. $d=2\text{ m}$



Autores

Debido a que para los diferentes casos estudiados la tendencia que se presentó no es constante y/o específica, se genera una incertidumbre al tratar de predecir el comportamiento del grupo de pilotes en el suelo arcilloso. Sin embargo es de resaltar que la capacidad última obtenida para grupo de pilotes en suelo granular es mayor a la obtenida en suelo arcilloso.

6. CONCLUSIONES

- ✚ PLAXIS 3D, permite obtener una solución numérica aproximada de la estructura de pilotes modelada, que cumple con el comportamiento físico del problema; es decir que considera la relación esfuerzo-deformación del sistema suelo-pilote, bajo la solución de diferentes ecuaciones de la mecánica del medio continuo que permiten caracterizar la física del problema, las cuales serían imposibles de resolver analíticamente. Por esta razón la técnica de elementos finitos es sin duda alguna una solución muy útil para resolver los problemas que se presentan en la práctica ingenieril.
- ✚ Utilizar PLAXIS 3D permite realizar simulaciones en las cuales es posible tener como variable de modelación la geometría del elemento estructural y observar el comportamiento que se obtiene a partir de los resultados obtenidos, tanto en la capacidad de carga del pilote como en su deformación; a diferencia de PLAXIS 2D en el cual debido a su limitante de trabajar en dos dimensiones y considerar un espesor unitario no es posible observar el cambio que se genera en la capacidad de carga al modificar la sección transversal del elemento.
- ✚ Los cálculos que realiza PLAXIS 3D se hacen a partir de la generación de una malla de puntos conocida comúnmente como nodos, a las cuales se les relaciona grados de libertad por medio de sistema de ecuaciones lineales. Anteriormente se demostró que una de las desventajas del software se presenta al definir las condiciones de borde del modelo; ya que como observamos en los resultados obtenidos, considerar un mayor espesor en el estrato de suelo inferior en el que se encuentra el pilote, hace que la

malla que se genere sea mucho más grande con mayor cantidad de nodos y por ende genere un incremento en la capacidad carga del pilote.

- ✚ Para el cálculo de la capacidad de carga vertical última de un pilote individual, el análisis de resultados obtenidos nos permite establecer un mayor grado de confianza hacia los valores que arroja PLAXIS 3D, a pesar de que los métodos convencionales presentan una tendencia similar a los métodos numéricos, estos últimos priman y resultan ser más apropiados porque además de cumplir con las condiciones hidráulicas, consideran la física del problema.
- ✚ El cálculo de la capacidad de carga última horizontal de los pilotes, obtenida a partir de los métodos convencionales sin duda alguna presenta varias inconsistencias; ya que los métodos propuestos no permiten considerar los diferentes estratos de suelo, bajo los cuales se encuentra cimentado el pilote. Utilizar solo un tipo de suelo para evaluar la capacidad de carga limita el efecto que puedan aportar los demás estratos a la resistencia última y adicionalmente la clasificación que se debe realizar de los pilotes como largos y cortos, en su intento por obtener valores más racionales, solo permitió sobrestimar y subestimar respectivamente la resistencia última horizontal del pilote.
- ✚ El comportamiento en forma de campana de Gauss que presentan algunos de los resultados obtenidos para la capacidad de carga del grupo de pilotes, se justifica por la superposición de esfuerzos que se generan alrededor de los pilotes debido a la poca separación que se presenta entre ellos. Éste fenómeno parece no afectar la capacidad de carga del grupo obtenida a partir de los métodos convencionales; ya que como observamos en los

resultados obtenidos la capacidad de carga del grupo aumenta linealmente, al aumentar el número de pilotes.

- ✚ Las observaciones y conclusiones realizadas en el desarrollo de la investigación se sustentan bajo la realización de 54 modelaciones tanto numéricas como convencionales por parte del grupo de pilotes, 12 para pilotes bajo carga vertical por parte de los métodos convencionales y 9 realizadas a partir del método numérico y finalmente para pilotes cargados bajo carga horizontal se efectuaron 12 modelaciones para cada método de estudio. Estas cifras no representan una población muestral significativa que permita comprender el comportamiento de las cimentaciones profundas modeladas en PLAXIS 3D, es prematuro dar respuestas a este tipo de resultados sin tener las evidencias suficientes; sin embargo la investigación muestra este escenario como una estimación inicial que requiere de una investigación más profunda.
- ✚ Los resultados obtenidos por los métodos numéricos para el cálculo de la capacidad de carga del grupo de pilotes presentan ciertas diferencias, por lo que no es posible establecer una tendencia específica de su comportamiento.

7. RECOMENDACIONES

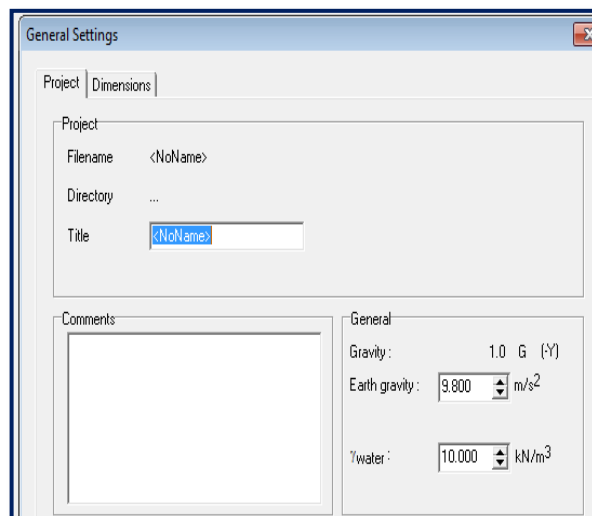
- Se recomienda realizar una investigación más profunda del programa PLAXIS 3D, debido a la heterogeneidad que se presentó en los resultados obtenidos; ya que éstos no permiten obtener una tendencia específica del comportamiento de la capacidad de carga última de las cimentaciones profundas estudiadas bajo los diferentes estratos de suelos analizados, en especial para el caso de grupos de pilotes. Para esto, se recomienda considerar un mayor campo muestral en lo que respecta a las modelaciones realizadas en PLAXIS 3D, específicamente es necesario considerar un mayor intervalo de variación de las longitudes de los pilotes que permitan discretizar mejor las variables involucradas y generar un mayor grado de confianza de los resultados obtenidos.
- Una vez se cuente con los datos suficientes que permitan un mayor grado de confianza hacia los resultados obtenidos, se recomienda hacer un análisis de costos de las cimentaciones, que permita comparar los dos métodos de estudio (convencionales y numéricos), principalmente para la utilización de grupo de pilotes, que por el momento y bajo el panorama que se observó en esta investigación se podría estar presentando un uso poco eficiente por parte de los métodos convencionales.
- Se recomienda considerar las desventajas que tiene PLAXIS 3D, en el caso de la asignación de las condiciones de borde para futuras modelaciones.

8. ANEXOS

8.1 Pasos para modelar en PLAXIS 3D

Primero el programa nos muestra una ventana de entrada de datos, la cual nos pide ciertos parámetros, entre otros como el nombre, la magnitud de la aceleración de la gravedad, el peso específico del agua y las unidades de fuerza, longitud y tiempo a utilizar.

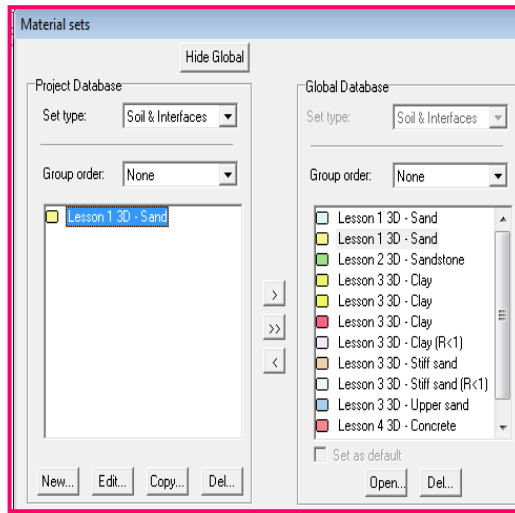
Figura 58. Gráfica de la ventana de entrada de datos generales del software



PLAXIS 3D

El paso siguiente es realizar la modelación de los materiales que se van a utilizar, para este caso nos referimos a los tipos de suelos y el concreto con sus respectivas propiedades. Esta operación se realiza utilizando el comando material set.

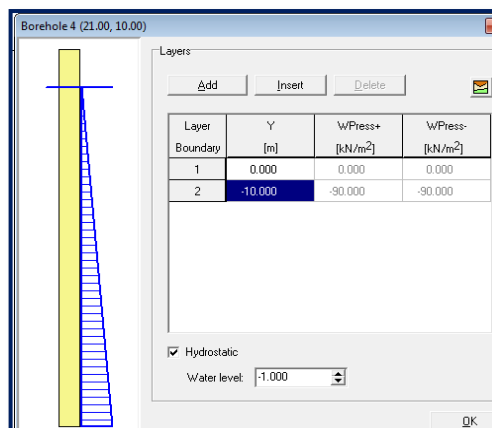
Figura 59. Gráfica de la ventana de modelación de los materiales en el PLAXIS 3D.



PLAXIS 3D

El paso siguiente es crear los estratos de suelo a modelar y asignarles las propiedades del perfil estratigráfico y ubicación del nivel freático, mediante la herramienta BOREHOLE.

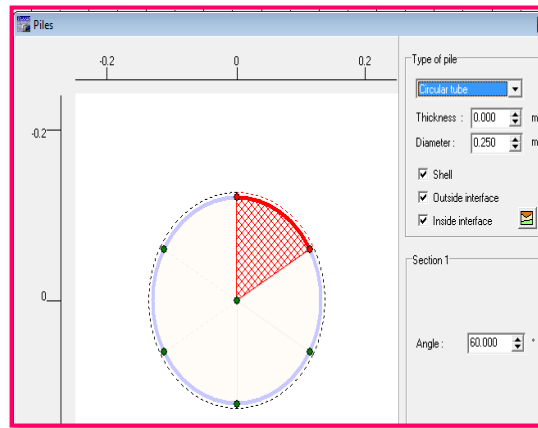
Figura 60. Ventana de la herramienta BOREHOLE en PLAXIS 3D.



PLAXIS 3D

Se realiza la modelación del tipo de sección transversal del pilote a utilizar y se asigna el diámetro respectivo, por medio de la herramienta PILE.

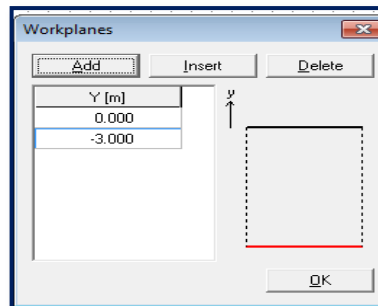
Figura 61. Ventana de modelación de la sección transversal de la cimentación.



PLAXIS 3D

El siguiente paso es asignar la longitud del pilote mediante la herramienta WORKPLANES.

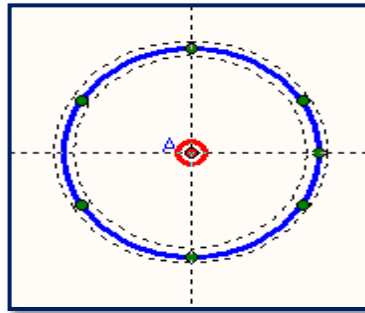
Figura 62. Gráfica de la asignación de la longitud del pilote a modelar.



PLAXIS 3D

El siguiente paso es modelar el punto de carga sobre el cual se realizara la sollicitación del pilote con la herramienta POINT LOAD.

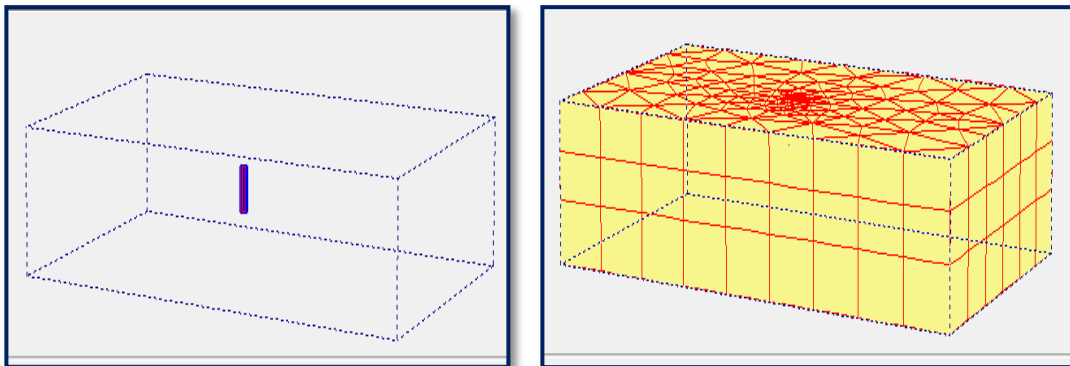
Figura 63.Gráfica del punto de carga sobre el cual se asigna la sollicitación del pilote.



PLAXIS 3D

Luego se realiza uno de los pasos más importantes en el proceso de modelación, el cual es crear la malla con la herramienta MESH para que sea posible realizar el cálculo utilizando el método de elementos finitos.

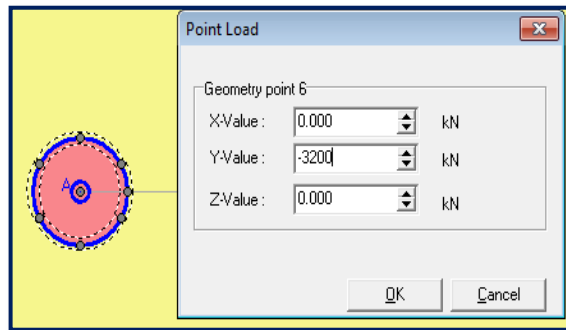
Figura 64.Gráfica de la malla en 3D del modelo de suelo a analizar.



PLAXIS 3D

Una vez terminada la fase de modelación, se procede a la fase de cálculo, la cual crea las fases a utilizar, para nuestro caso se crean 2 fases, una fase de construcción y otra de carga.

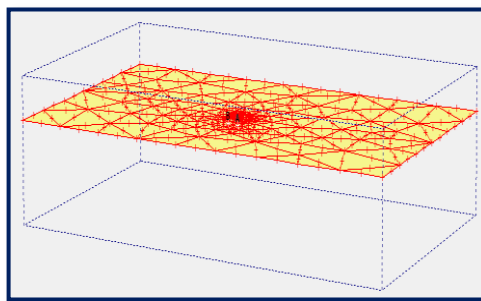
Figura 65. Gráfica de la etapa de construcción y carga del pilote a modelar.



PLAXIS 3D

Antes de correr el modelo se asignan unos puntos específicos en los cuales se requiera una mayor información. Una vez realizado el modelo a partir de éstos se pueden obtener gráficas en las cuales es posible observar que porcentaje de la carga impuesta resiste el pilote y la deformación que este presenta.

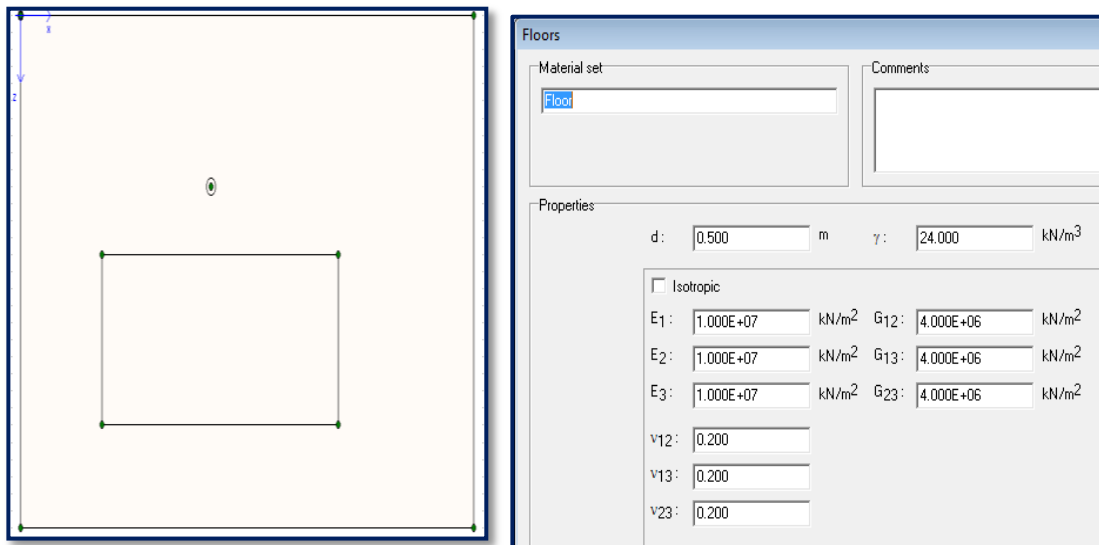
Figura 66. Gráfica de los puntos de control en la malla de modelación.



PLAXIS 3D

Adicionalmente, para la modelación de grupo de pilotes solo se debe tener en cuenta la geometría de la losa de cimentación que se asigna con la herramienta LINE, después se asigna el material en la pestaña FLOOR y se cambian las propiedades con las cuales se quiere realizar el modelo, como por ejemplo el espesor y su peso específico.

Figura 67. Gráfica de la losa de cimentación y la ventana de modelación de elementos tipo FLOOR.



PLAXIS 3D

9. BIBLIOGRAFÍA

BOWLES, J. E. (s.f.).1997. Foundation analysis and design. Mc Graw- Hill Book Company.

CASTELLANOS, D. M. (2012). Evaluación del comportamiento de pilotes mediante la técnica de elementos finitos. Universidad Industrial de Santander.

DAS, B. M. (s.f.).1999 Principios de Ingeniería de Cimentaciones. California State University, Sacramento.

DAVIS, H. G. (n.d.).1980. Pile Foundation Analysis and Design. University of Sydney.

MURTHY, V. (n.d.). 2002. Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Chapter 15 Deep Foundation I, Pile Foundation. Marcel Dekker, INC.

PLAXIS. (s.f.). Obtenido de www.plaxis.nl