

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
Facultad de Construcciones.
Departamento de Ingeniería Civil.**



TESIS DE GRADO

Análisis de fallo en grupo y fricción negativa en cimentaciones sobre pilotes.

AUTOR: Rossana Beatriz Valdivia Reina.

TUTOR: Dr. Ing. Luis O. Ibáñez Mora

Santa Clara 2017

Pensamiento

No es la inteligencia, recibida y casual lo que da al hombre honor, sino, el modo con que la usa y la salva. No hay más de un modo de perdurar: y es servir.

José Martí.

Dedicatoria:

*A mi mamá que, aunque hoy este lejos de alguna manera
está bien presente. Por haber sido mi guía, mi amiga,
mi confidente y mi motor impulsor.*

A mi papá por ser mi orgullo y ejemplo a seguir,

A mi abuela por cada uno de sus sabios consejos.

*A toda la familia porque siempre me apoyaron y esto es
gracias a todos ustedes.*

Agradecimientos

*A mis padres que siempre están allí para apoyarme.
Gracias por existir y hacer de mí quien soy hoy, con
su guía y apoyo.*

*A toda mi familia que de una forma u otra siempre
estuvieron allí para mí, me apoyaron, y la verdad que
sin ustedes no lo hubiera podido lograr.*

*A mi novio y su familia, que son la mía. Gracias por
escucharme, apoyarme, y confiar en mí.*

*A mis amistades que las llevo muy dentro del corazón
que siempre los voy a recordar, me llevo lo más bonito
de cada uno de ustedes. Y decirles que fue la mejor*

etapa que he vivido y muchas gracias por participar en ella de una forma u otra.

A mi tutor Luis Orlando Ibáñez Mora por ayudarme y orientarme con paciencia y dedicación

A Gilberto Zuevedo por prepararme en este trabajo de diploma.

A todos aquellos que me acompañaron en esta linda experiencia, gracias por todo, de cada uno aprendí.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 1: Estado del Arte.	8
1.1 Introducción.....	8
1.2 Estudio del diseño de cimentaciones sobre pilotes.....	8
1.2.1 Métodos para el diseño de cimentaciones sobre pilotes.....	10
1.2.2.1 Prueba de carga	10
1.2.2.2 Métodos dinámicos	11
1.2.2.3 Ensayos de penetración	11
1.2.2.4 Métodos estáticos basados en la teoría de la plasticidad	12
1.2.2 Métodos para determinar los asentamientos en la base de las cimentaciones sobre pilotes.	14
1.2.3 Cálculo de asentamientos en grupos de pilotes.	17
1.3 Falla en grupo.....	20
1.3.1 Eficiencia de grupo.....	20
1.3.2 Cargas de hundimiento.	23
1.3.3 Análisis de grupos de pilotes mediante zapatas equivalentes.	24
1.4 Fricción negativa	25
1.4.1 Fricción negativa en pilotes.	25
1.4.2 Fricción negativa por fuste. Carga de arrastre y movimiento por arrastre.....	29
1.4.3 Cálculo de la carga de hundimiento cuando se produce fricción negativa.	30
1.5 Modelación matemática de las cimentaciones sobre pilotes.	31
1.5.1 La modelación matemática y los métodos numéricos.....	32
1.5.2 Dificultades para la modelación de los geomateriales	34
1.6 Ensayos a escala real.....	35
1.7 Conclusiones parciales.....	36
Capítulo 2. Estudio del trabajo de grupos de pilotes y fricción negativa en cimentaciones sobre pilotes	37
2.1 Introducción.....	37
2.2 Análisis de los softwares para la modelación de cimentaciones sobre pilotes.	37
2.2.1 Programa Plaxis 2D (versión 8.6) y 3D (versión 1.6)	37
2.2.2 Geo5 (versión 2016)	38
2.3 Modelación por Elementos Finitos de cimentaciones en pilotes	40
2.4 Propuestas del modelo para el análisis del grupo de pilotes.....	43

2.5 Propuestas de un modelo para el análisis de la fricción negativa	50
2.6 Conclusiones Parciales	62
Capítulo 3. Análisis del efecto de la fricción negativa y el fallo en grupo en cimentaciones sobre pilotes	63
3.1 Introducción.....	63
3.2 Análisis de la fricción negativa.....	63
3.3 Estudios de campo	69
3.3.1 Holanda (Plomp y Mierlo, 1948).....	69
3.3.2 Canadá (Bozozuk, 1981).....	71
3.3.3 Modelo teórico propuesto.....	72
3.4 Análisis de un grupo de pilotes	76
3.5 Modelación del fallo en grupo.....	79
3.6 Conclusiones Parciales	82
CONCLUSIONES.....	83
RECOMENDACIONES	83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

RESUMEN

En el siguiente trabajo de diploma se realiza un análisis de los fenómenos del trabajo en grupo y fricción negativa en cimentaciones sobre pilotes. Cada uno de manera independiente son considerados temas importantes a estudiar. La fricción negativa es la fuerza que tiende a hundir el pilote generando una presión concentrada en la punta del mismo. La separación entre pilotes es un elemento principal tanto para el comportamiento del terreno en que se encuentra como para la distribución de cargas en el grupo.

Con la ayuda de softwares como el Plaxis y el Geofine se analizan ejemplos de pilotes con diferentes características afectados por estos fenómenos. Un pilote de 10m de longitud es analizado variando su módulo de deformación dando como resultado que a medida que disminuye el módulo de deformación del suelo en la cara del pilote (en la que genera fricción negativa) menor es el valor de la capacidad resistente del mismo. Para el análisis del fallo en bloque de un grupo de pilotes se realizó una variación de su espaciamiento para comprobar cuanto varia su rotura.

Cada uno de estos modelos fueron analizados para demostrar para que valores reales ocurren estos fallos en la actualidad.

ABSTRACT

In the following diploma work an analysis of the phenomena of group work and negative friction in piles foundations is carried out. Each of them independently are considered important subjects to study. The negative friction is the force that tends to sink the pile generating a concentrated pressure in the tip of the pile. The separation between piles is a main element both for the behavior of the ground in which it is found and for the distribution of loads in the group.

With the help of software like Plaxis and Geofine, examples of piles with different characteristics affected by these phenomena are analyzed. A 10m long pile is analyzed by varying its deformation modulus, resulting in the lowering of the soil deformation modulus on the side of the pile (in which it generates negative friction), the lower the resistance capacity of the pile. For the analysis of the block failure of a group of piles a variation of their spacing was made to check how much their rupture varies.

Each of these models were analyzed to demonstrate for what actual values these faults occur today.

Introducción.

INTRODUCCIÓN

El pilotaje constituye hoy en día el principal procedimiento de cimentación en terrenos difíciles. Su uso se remonta a hace más de 1200 años, en Suiza, y actualmente, con el desarrollo de la ciencia y la técnica, es difícil encontrar un problema que no se pueda resolver con estos elementos. De forma general los pilotes son los encargados de transmitir la carga que procede de la estructura, al suelo que lo rodea, a través de la fricción de las caras y a los estratos más fuertes e incompresibles o roca que yacen bajo la punta de los mismos. En el país su uso está estrechamente vinculado a obras ubicadas en zonas costeras y a cimentaciones de puentes, debido a la compresibilidad de algunos suelos y en otros debido a la magnitud de las solicitaciones actuantes. El número de expresiones existentes, para determinar la capacidad de carga y las deformaciones es muy elevado utilizando factores y coeficientes que se han obtenido a partir de ensayos, para condiciones específicas de suelos, diferentes a las de Cuba. Con el auge del turismo, el uso de las cimentaciones sobre pilotes, alcanza una mayor aplicación, y de aquí la necesidad de realizar un profundo análisis de su comportamiento. Por otra parte, a nivel mundial, con el desarrollo de las tecnologías constructivas se observa un aumento en la utilización de cimentaciones profundas.

En el ámbito mundial, en los últimos 20 años se ha producido un cambio en cuanto a las ideas del comportamiento del pilote, considerándose este no como el conjunto de pilotes, sino estos más el terreno. Los cálculos, tan rápidos y eficientes hoy por el empleo de la computación permiten, comprender mejor la siempre existente interacción entre pilotes y terreno, y las deducciones teóricas han podido comprobarse por medio de la modelación y por ensayos en casos reales.

La capacidad de una cimentación sobre pilotes para soportar cargas o asentamientos, depende de forma general del cabezal, el fuste del pilote, la transmisión de la carga del pilote al suelo y los estratos subyacentes de roca o suelo que soportan la carga de forma instantánea. Al colocar un pilote en el suelo, se crea una discontinuidad en el medio según la forma de instalación del mismo. Para el caso de pilotes fundidos "in-situ", la estructura de las arcillas se desorganiza y la capacidad de las arenas se reduce. En la hinca, dentro de la zona de alteración (1 a 3 diámetros) se reduce la resistencia a cortante en arcillas, sin embargo, en la mayoría de los suelos no cohesivos se aumenta la compacidad y el ángulo de fricción interna. En el análisis de la

transferencia de la carga, todos los autores, [Jiménez (1986), Juárez (1975), Sowers (1977), Lambert (1991), Zeeveart (1992)] coinciden que la carga se trasmite por la punta del pilote, a compresión, denominada "resistencia en punta" y/o por esfuerzo a cortante a lo largo de la superficie del pilote llamada "fricción lateral". Sin embargo, en todos los casos no se desarrollan ambas resistencias, y el estado deformacional para alcanzarlas difiere grandemente. Para las arcillas, el aporte a fricción predomina sobre el aporte en punta, no siendo así para el caso de las arenas. La determinación de los asentamientos, constituye, para estas cimentaciones un problema teóricamente muy complejo, por las incertidumbres que surgen al calcular la variación de tensiones por carga impuesta y por no conocer que porcentaje de la carga es la que provocará deformaciones.

Finalmente, al analizar estas cimentaciones, no se deben ver como un pilote aislado, sino como un conjunto, donde también intervienen el cabezal y el suelo adyacente a la cimentación, y donde el comportamiento de un pilote dependerá en gran medida de la acción de los pilotes vecinos.

En las cimentaciones sobre pilotes se pueden realizar fenómenos como el fallo en grupo y la fricción negativa.

Para que ocurra el fallo en grupo debe cumplirse que: (norma cubana)

- Espaciamiento / Diámetro (SP/D) < 3
- Cabezal apoyado al suelo
- Suelo casi homogéneo.

Sería necesario poder determinar el comportamiento del pilotaje visto como la trilogía pilote – encepado – suelo, ante esta situación evaluando el mecanismo de fallo que se genera tanto en las caras de la cimentación como en la base. Sin duda alguna solo un análisis espacial (3D) podría llevarnos a soluciones veraces.

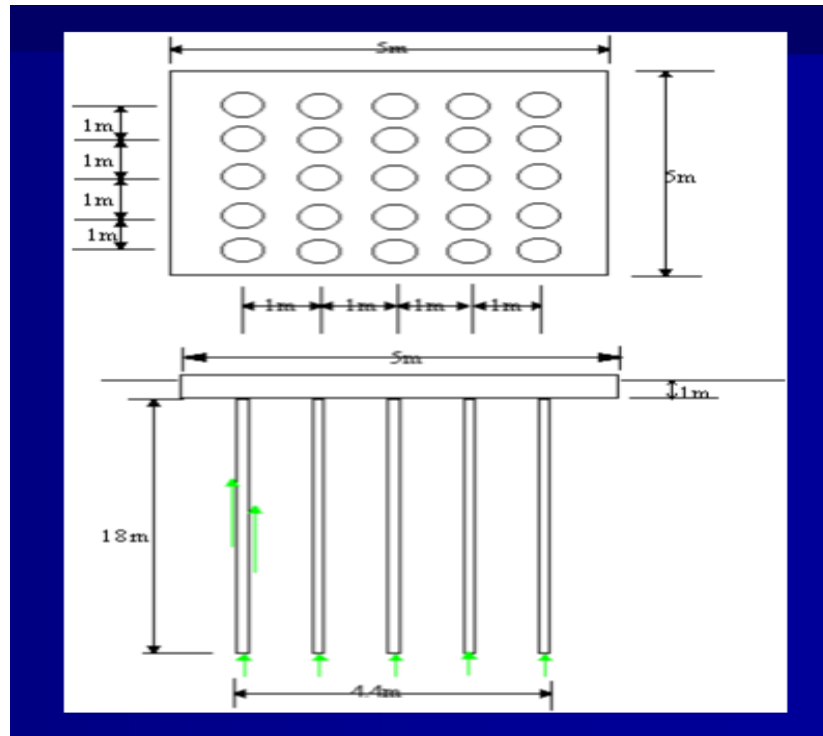


Figura I. Diseño de grupos de pilotes

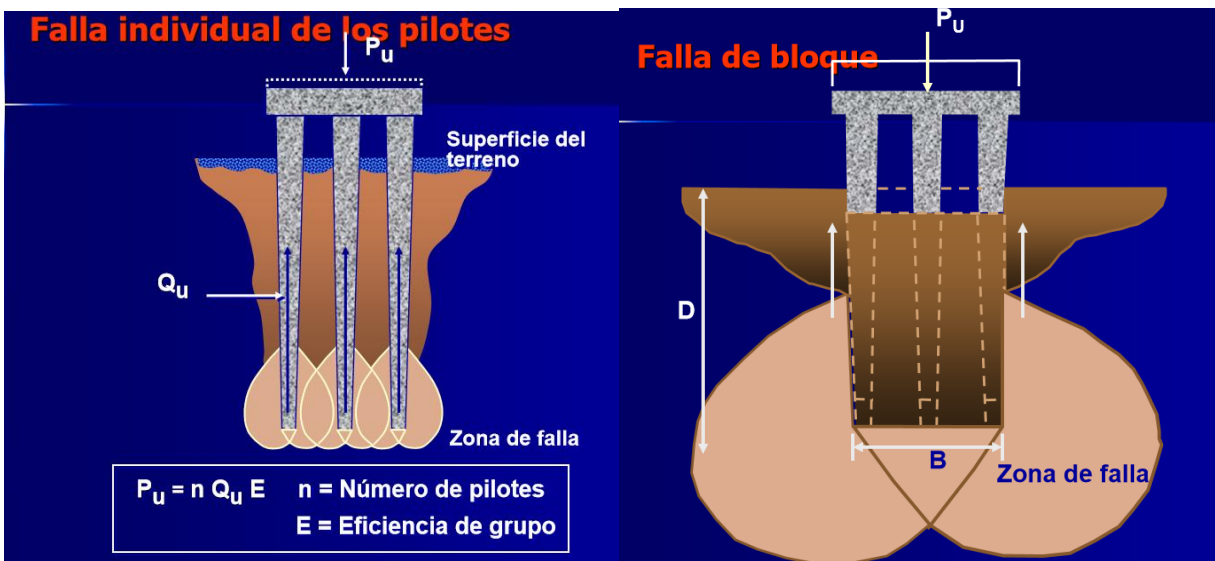


Figura II. Modos de falla de grupos de pilotes

En situaciones donde el suelo alrededor de un pilote lo mueve hacia abajo, a esto se le denomina **fricción negativa**, esta fricción tiende a hundir el pilote y si este no puede penetrar más, en la punta del pilote se generará una presión concentrada. Este caso se puede presentar cuando se hince un pilote en un estrato blando en cuya superficie se coloca un relleno que consolide el

terreno, entonces este al consolidarse generará en las caras del pilote unas fuerzas de fricción que se denominan fricción negativa.

Actualmente es imposible predecir con precisión la fricción negativa que se producirá en un pilote. Sin embargo, la máxima fuerza que se desarrollará por fricción negativa puede evaluarse si se asume la distribución de esfuerzos de fricción propuesta por Tomlinson (1987). Aunque dicho autor diferencia los casos entre estrato comprensible e incomprensible en la base, el mismo procedimiento puede emplearse en todos los casos con suficiente precisión.

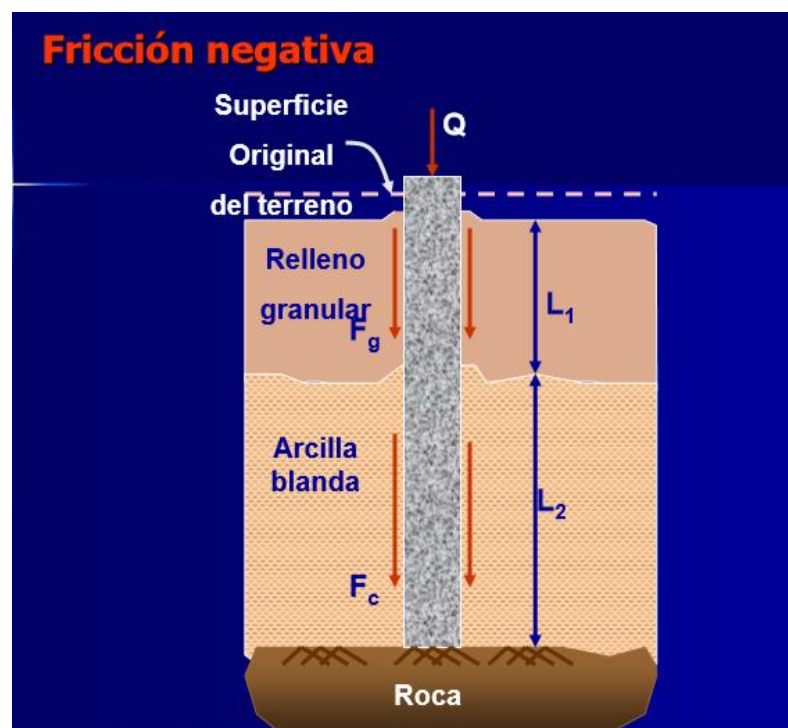


Figura III. Fricción Negativa en pilotes

Planteamiento y definición del problema

En las cimentaciones sobre pilotes pueden ocurrir varios fenómenos entre los que podemos mencionar el trabajo en grupo (fallo y eficiencia de grupo) y la fricción negativa. Las expresiones existentes para analizar dichos fenómenos tienen su fundamento en teorías clásicas y la experiencia de diferentes autores.

Fundamentación

Con el empleo de expresiones y metodologías para el análisis del fallo en bloque y fricción negativa, basados en la modelación matemática se pueden obtener diseños más racionales.

Hipótesis

A través de la aplicación de la modelación matemática se pueden modelar los fenómenos del trabajo en grupo y fricción negativa, obteniéndose expresiones más precisas para el diseño de cimentaciones sobre pilotes.

Objetivo principal

Evaluar a través de la modelación matemática los fenómenos (trabajo en grupo y fricción negativa).

Objetivos específicos

- Realizar un estudio bibliográfico de los fenómenos del trabajo en grupo y fricción negativa.
- Realizar una búsqueda bibliográfica sobre softwares para el análisis del trabajo en grupo y la fricción negativa.
- Desarrollar una modelación matemática del trabajo en grupo y fricción negativa.

Metodología de la Investigación:

Para realizar la actual investigación se definen las siguientes etapas, las cuales se complementan entre sí.

Etapas I: Definición de la problemática.

- Definición del tema y problema de estudio.
- Recopilación bibliográfica.
- Formación de la base teórica general.
- Planteamiento de las hipótesis.
- Definición de los objetivos.
- Definición de tareas científicas.
- Redacción de la introducción.

Etapas II: Revisión bibliográfica.

- Estudio, análisis y crítica de los últimos adelantos científicos relacionados con el tema.
- Redacción del Capítulo I.

Se da cumplimiento al objetivo específico 1.

Etapas III: Aplicación de softwares para la modelación matemática.

- Obtención de los resultados de la modelación del fallo en grupo y la fricción negativa
- Análisis e interpretación de los resultados de las expresiones simplificadas.
- Redacción del Capítulo II.

Se da cumplimiento al objetivo específico 2.

- *Etapas IV:* Proposición de ejemplos de fallo en grupo y fricción negativa.
- Redacción del capítulo III.

Elaboración de conclusiones y recomendaciones

Pregunta de investigación

¿Qué aplicación puede tener la modelación del trabajo en grupo y la fricción negativa para el diseño de cimentaciones sobre pilotes?

Tareas de Investigación

- Búsqueda bibliográfica de los fenómenos fallo en grupo y fricción negativa, así como de los softwares para su modelación.
- Evaluar las expresiones resultantes para su adecuado uso en la actualidad.

Novedad Científica

Emplear herramientas computacionales en la modelación de fallo en grupo y fricción negativa para proponer expresiones que se adecuen a la realidad.

Aportes

Después de finalizado el trabajo se comprobará si las expresiones obtenidas podrán usarse adecuadamente en la actualidad.

Estructura de la Tesis

La estructura de la tesis está relacionada directamente con la metodología de la investigación establecida y de un modo específico en el desarrollo particular de cada una de las etapas de la investigación. La misma se encuentra formada por una introducción general, tres capítulos, las conclusiones, recomendaciones y bibliografía.

El orden y estructura lógica del trabajo se establece a continuación:

- **Síntesis**

- **Introducción**
- **Capítulo I:** Estado del Arte.
- **Capítulo II:** Estudio del trabajo de grupos de pilotes y fricción negativa en cimentaciones sobre pilotes.
- **Capítulo III:** Análisis del efecto de la fricción negativa y el fallo en grupo en cimentaciones sobre pilotes.
- **Conclusiones**
- **Recomendaciones**
- **Bibliografía**

Capítulo 1.

Capítulo 1: Estado del Arte

1.1 Introducción

La cimentación sobre pilotes se utiliza cuando, no hay suficiente firme en profundidades alcanzables por zapatas o pozos, o cuando se hace imposible utilizar cimentaciones superficiales en la estructura a construir debido a las características que esta presenta. Existen varios métodos para calcular sus asentamientos, como son: métodos empíricos para pilotes aislados, métodos de la función de transferencia, procedimientos elásticos, métodos simplificados, teóricos y aproximados. En este tipo de cimentación ocurren varios fallos, entre ellos el fallo en grupo, generalmente los pilotes se agrupan para formar cimentaciones a las que se da continuidad mediante el encepado. Dicho encepado es un elemento estructural que se encarga de transmitir las cargas a los pilotes y no al terreno. La separación entre pilotes es una variable fundamental tanto para el comportamiento del terreno como para la distribución de cargas en el grupo. En estas cimentaciones también está presente la fricción negativa que no es más que situaciones donde el suelo alrededor de un pilote lo mueve hacia abajo, esta fricción tiende a hundir el pilote y si este no puede penetrar más, en la punta del pilote se generará una presión concentrada. En este capítulo se hará una revisión bibliográfica sobre estos dos fenómenos que afectan a las cimentaciones sobre pilotes, así como el uso de softwares que nos permitan su modelación matemática, a través de la cual se obtendrán resultados de expresiones más precisas.

1.2 Estudio del diseño de cimentaciones sobre pilotes

Las cimentaciones por pilotaje tienen varias condiciones de utilización, por lo que podemos decir que se utilizan cuando:

- No existe firme en una profundidad alcanzable con zapatas o pozos.
- Se quieren reducir o limitar los asentamientos del edificio.
- La permeabilidad u otras condiciones del terreno impiden la ejecución de cimentaciones superficiales.
- Las cargas son muy fuertes y concentradas (caso de torres sobre pocos pilares)

Las cimentaciones sobre pilotes están clasificadas por diferentes factores, los cuales se mostrarán a continuación en la tabla 1.1

Tabla 1.1 Clasificación de las cimentaciones sobre pilotes.

Según su instalación	-Pilotes aislados -Grupo de pilotes
Según el tipo de carga que actúa sobre el pilote	-A compresión - A tracción - A flexión -A flexo-compresión
Por la forma de la sección transversal	-Cuadrados -Circulares -Doble T -Prismaticos -T -Otros
Según el tipo de material del pilote	-De madera -De concreto -De concreto armado -De acero o metálico -Pilotes combinados o mixtos.
Según la interacción suelo-pilote	-Pilotes resistentes en punta -Pilotes resistentes en fuste o a fricción -Pilotes resistentes en punta y fustes simultáneamente.
Por la forma en que se construye	-Pilotes prefabricados hincados con ayuda de martillos sin extracción previa del suelo. -Pilotes hincados por vibración con o sin perforación del suelo -Pilotes de concreto armado con camisa, hincados con relleno parcial o total -Pilotes fundidos in situ de concreto o concreto armado

En la cimentación los pilotes están sometidos predominantemente a cargas verticales, pero en algunos casos deben tenerse en cuenta otros tipos de solicitaciones como son:

- Cargas horizontales debidas al viento, empujes de arcos o muros etc.
- Rozamiento negativo al producirse el asiento del terreno en torno a pilotes columna por haber extendido rellenos o sobrecargas, rebajar el nivel freático a través de suelos blandos aún en proceso de consolidación.
- Flexiones por deformación lateral de capas blandas bajo cargas aplicadas en superficie.
- Esfuerzos de corte, cuando los pilotes atraviesan superficies de deslizamiento de taludes

1.2.1 Métodos para el diseño de cimentaciones sobre pilotes

Para determinar la capacidad de carga en pilotes se han desarrollado fórmulas y criterios que pueden agruparse en cuatro clases que se citan a continuación:

- Pruebas de Cargas.
- Métodos Dinámicos.
- Ensayos de Penetración.
- Métodos Estáticos basados en la teoría de Plasticidad

1.2.2.1 Prueba de carga

El método más seguro para determinar la capacidad de carga de un pilote, para la mayoría de los lugares, es la prueba de carga [Juárez (1975), Sowers (1977), Paulos y Davis (1980), Jiménez (1986), Lambert (1991), Fellenius (2001), Vega Vélez (2005)]. Dentro de ellas se han desarrollado la prueba de asiento controlado (controlando el incremento de asiento o a una velocidad de asiento constante) y la prueba con carga controlada (incremento de carga constante en el tiempo o asiento mínimo para un incremento de carga). Este último es el más usado, ya que permite determinar la carga última cuando se ha movilizadado la resistencia del suelo que se encuentra bajo la punta y rodeando al pilote. En esencia, estas pruebas, no son más que experimentar a escala real, un pilote, para procesar su comportamiento bajo la acción de cargas y determinar su capacidad de carga. Precisamente, su inconveniente fundamental estriba en su elevado costo y en el tiempo requerido para realizarla.

Sowers (1977), recomienda que los resultados del ensayo son una buena indicación del funcionamiento de los pilotes, a menos que se hagan después de un período de tiempo. Jiménez (1986) muestra preocupación ya que el pilote de prueba puede representar o no la calidad de los pilotes definitivos. Otra limitación planteada por este autor radica en que la prueba de carga se realiza generalmente a un solo pilote y se conoce que el comportamiento de un grupo es diferente al de la unidad aislada.

Se puede plantear que la prueba de carga es un método bastante seguro en la determinación de la carga última de los pilotes, siempre que se proporcione el mismo grado de calidad al pilote en prueba y al definitivo, pero es muy costoso y por esto se toman otras alternativas en la medición de la capacidad de carga.

1.2.2.2 Métodos dinámicos

Estos métodos generalmente se asocian a la hincada de pilotes. Producto de la hincada de pilotes produce fallas sucesivas de la capacidad de carga del pilote, entonces se podría establecer teóricamente la relación entre la capacidad de carga del pilote y la resistencia que ofrecen a la hincada con un martillo.

La propuesta de la Norma Cubana (1989) para este aspecto establece lo siguiente:

La carga resistente por estabilidad del pilote aislado se determina según dos métodos dinámicos:

1. Ecuación de la onda.
2. Fórmulas de hincada.

Se puede plantear que siempre que se cuente con la adecuada instrumentación electrónica [Aoki (1997), Balech (2000)] y una correcta modelación matemática, se puede estimar la capacidad de carga de las cimentaciones sobre pilotes por métodos dinámicos.

1.2.2.3 Ensayos de penetración

Los ensayos de penetración son utilizados frecuentemente para determinar la capacidad soportante de los pilotes. El estado tensional y deformacional en el suelo debido a un pilote cargado con su carga última y el de un penetrómetro que se introduce en el suelo son muy similares. Por esta razón se puede establecer una relación muy estrecha entre la resistencia a penetración y la capacidad soportante del pilote [Menzanbach (1968a)]. En Cuba se utilizan los modelos de penetración del cono holandés y los modelos soviéticos S-979 y Sp-59. Un análisis de las expresiones utilizadas para la determinación de la capacidad resistente por estabilidad del pilote aislado, evidencia, que estas no son más que la suma del aporte a fricción y en punta, afectados por un factor de escala entre la resistencia en punta del cono de penetración y la punta del pilote y un factor de escala entre la fricción sobre la camisa del penetrómetro y el fuste del pilote.

A modo de conclusión, los ensayos de penetración, a pesar del grado de empirismo que encierran (Factores de escala), tienen un gran carácter regional, ya que se obtienen de ensayos realizados en lugares específicos y de aquí su limitación de aplicación. Por otra parte, es importante señalar que este método permite determinar la capacidad resistente por estabilidad del pilote aislado, y

como se ha expresado, el comportamiento de un pilote está estrechamente vinculado a la acción de los pilotes vecinos.

1.2.2.4 Métodos estáticos basados en la teoría de la plasticidad

Son fórmulas que están basadas en principios teóricos y ensayos, que procuran determinar la capacidad máxima de carga que es capaz de resistir un pilote o grupo de estos en el medio (Suelo). Sowers (1977), Juárez (1975), Jiménez (1986) (1994), la Norma Soviética, L´ Herminier (1968), la Norma SNIP (1975), la CNC 73001 (1970), Norma Cubana (1989), Ibáñez (2001) entre otros coinciden en que la capacidad de carga se obtiene de la suma de la resistencia por la punta y por la fricción lateral en el instante de carga máxima:

$$Q_{total} = Q_{punta} + Q_{fricción} \quad \text{Ec. (1.1)}$$

Para el aporte en punta puede aceptarse:

$$Q_{punta} = A_b * q_p \quad \text{Ec. (1.2)}$$

A_b : el área de la punta y q_p la resistencia unitaria de punta.

Respecto a la fórmula inicial lo que se refiere a Q fricción puede aceptarse la expresión clásica:

$$Q_{fricción} = \pi * D * \sum L_i * f_{si} \quad \text{Ec.(1.3)}$$

Donde:

D : es el diámetro del pilote

L_i : es la longitud de cada estrato atravesado por el pilote

f_{si} : la resistencia lateral en cada capa o estrato de suelo.

Existen dos tendencias generales para el cálculo de la capacidad de carga, la primera y tradicional utilizada para suelos cohesivos friccionales y la segunda desarrollada después de la década de los 80, donde se considera solo suelos friccionales, trabajando en esfuerzos efectivos y suelos cohesivos, con resistencia al corte del ensayo rápido, trabajando a esfuerzos totales.

En el método tradicional el aporte en fuste se determina en función de la resistencia a cortante o la adherencia y/o la fricción que se genera en la cara del pilote. Para el caso del aporte en punta se emplean expresiones similares a la propuesta por Meyerhof (1995) para cimentaciones superficiales. En los enfoques actuales para el cálculo de la resistencia por el fuste ($Q_{fricción}$) se mantiene de forma general el enfoque occidental, donde coexisten dos métodos llamados

método de las tensiones totales y método de las tensiones efectivas. El primero se apropia a suelos coherentes, y en ellos se toma como resistencia del fuste la resistencia del terreno a esfuerzo cortante sin drenaje, multiplicado por un coeficiente empírico, pero que depende del tipo de terreno, forma de construcción del pilote, etc., para establecer la adherencia pilote suelo. En el método de las tensiones efectivas, se toma como resistencia por el fuste la presión efectiva sobre el plano horizontal multiplicada por un coeficiente (β) [Jiménez(1994), Arystón (1998)] que es una función de los parámetros que definen la ley de resistencia del suelo, la forma de instalación del pilote y el material del cual fue construido. La determinación del aporte en punta (Q_{punta}), ha permitido el desarrollo de interesantes teorías, pero en la práctica se resuelven de forma sencilla. En los suelos cohesivos, se aceptan valores de nueve veces la resistencia a cortante sin drenaje, como aporte en punta. Sin embargo, para los suelos friccionales la resistencia en punta constituye la parte mayor de la resistencia que el pilote puede desarrollar, pero la toma de muestras inalteradas es una tarea muy difícil.

Dentro de toda la problemática narrada anteriormente, y referido al diseño [Juárez (1975), Sowers (1977), Paulos y Davis (1980), Jiménez (1986) Albiero (1990)], se puede expresar que el problema se centra sobre la capacidad portante del pilote aislado, y sobre su comportamiento respecto al asiento bajo la carga de trabajo nominal (N_{pilote}). El comportamiento del grupo se estima después mediante el uso de factores de interacción o de eficiencia derivados de modelos y/o fórmulas empíricas.

INVARIANTES PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CARGA EN LAS CIMENTACIONES SOBRE PILOTES.
La capacidad de carga del pilote (Q_t) depende del aporte que se genera en la punta (Q_p) más el aporte que se genera a fricción (Q_f) en las caras del pilote, corregido por un factor de eficiencia que evalúa el comportamiento del pilote aislado en el grupo (ξ).
La capacidad de carga de una cimentación sobre pilote dependerá entonces de: ▪ Dimensiones del pilote. ▪ Medio. ▪ Distribución de pilotes. ▪ Forma de instalación.
Las dimensiones determinan :

▪ Area de la punta. ▪ Perímetro del pilote.
Según el medio (Suelo) se establecerá: ▪ Ley de resistencia del material (Resistencia a cortante (S)) y los parámetros que lo caracterizan (C – Cohesión, ϕ - Ángulo de Fricción Interna, γ - Densidad) ▪ $S = C$ (Suelos cohesivos) ▪ $S = \phi$ (Suelos friccionales) ▪ $S = C + \sigma \tan \phi$. (Suelos cohesivos friccionales)
INVARIANTES PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CARGA EN LAS CIMENTACIONES SOBRE PILOTES.
▪ Tipo de falla en el fuste ▪ Falla suelo – suelo. ▪ Falla suelo – pilote. ▪ Empuje lateral de tierra. ▪ Presión efectiva vertical en la cara del pilote. ▪ Los parámetros que definen el comportamiento del medio (suelo) influyen, además, en la presencia de la fricción negativa y el fallo en grupo. La forma de distribución de los pilotes influye en: ▪ Fallo en grupo. ▪ Eficiencia del grupo. La forma de instalación determina: ▪ Tipo de falla en el fuste: ▪ Falla suelo – suelo. ▪ Falla suelo – pilote. Presión efectiva vertical en la cara del pilote (K).

1.2.2 Métodos para determinar los asentamientos en la base de las cimentaciones sobre pilotes

Es precisamente una de las razones del surgimiento de las cimentaciones sobre pilote el de conseguir asentamientos pequeños. A la hora de calcular los asentamientos debe tenerse en cuenta los dos mecanismos resistentes. Puede decirse que, generalmente, se moviliza primero

la resistencia por fuste, con asientos del orden de 0.5 al 11% del diámetro del pilote, mientras que se acaba de movilizar la resistencia en punta con asentamientos del orden del 10 a 20 veces la cifra anterior. Se puede definir entonces [Sowers (1977), Vesic (1977)] que el asentamiento de un pilote aislado proviene del acortamiento elástico del fuste del pilote y, en parte, de la distorsión del suelo alrededor del pilote, más la deformación de los estratos sobre los que descansa.

Para calcular los asentamientos se pueden citar los siguientes métodos (Ibáñez (1997)):

- Métodos empíricos para pilotes aislados.
- Métodos de la función de transferencia.
- Procedimientos elásticos.
- Métodos simplificados.
- Métodos teóricos.
- Métodos aproximados.

A continuación, se describen algunos de éstos métodos.

Cálculo de los asentamientos para el pilote aislado:

a) Métodos empíricos: están basados en la recopilación de ensayos o son una recomendación de los diferentes autores.

a.1) Meyerhof (1960) plantea que el asentamiento depende del diámetro del pilote.

a.2) Aschenbrenner y Olson (1968) también lo ponen en función del diámetro. Menzenbach (1968a) hace mención a resultados similares para 60 pruebas de cargas en diferentes tipos de suelos.

b) Los procedimientos elásticos están basados en la integración de las soluciones de Midlin (1973) al caso de una fuerza concentrada en el interior de un semiespacio de Boussinesq. En ellos el pilote y el cabezal se consideran por separado y sometidos a fuerzas iguales y contrarias. Su aplicación es acertada en arcillas donde se asume que el módulo de elasticidad es constante con la profundidad.

c) Vesic (1977) plantea que el asentamiento de la cabeza de un pilote puede separarse, en el asiento debido a la compresión axial del propio pilote, asiento de la punta causado por la carga que dicha punta aplica sobre el suelo y el asentamiento de la punta causado por las distintas cargas transmitidas al terreno a lo largo del fuste.

d) Métodos experimentales.

d.1) Borland, Butler y Duncan (1966) para el caso de arcillas en Londres, consideran un comportamiento lineal del suelo.

d.2) Whitaker y Cooke (1970) realizan un análisis similar.

d.3) Kezdi (1964) determinó que para el eje de un área cargada circular cimentada a profundidad, empleando la ecuación para la tensión bajo una carga puntual, el asentamiento depende del diámetro del pilote, la tensión bajo la base del pilote, el módulo de compresibilidad del suelo y de tres factores de influencia.

d.4) La Propuesta de Norma (1989) propone convertir la cimentación sobre pilotes en una cimentación ficticia con ancho en función del tipo de suelo y seguir la misma metodología que para una cimentación superficial donde se calculan los asentamientos por la expresión de sumatorias de capas que se propone de la Propuesta de Norma de Cimentaciones Superficiales, que depende del espesor del estrato que se analiza y la variación de la deformación unitaria en la parte superior, centro e inferior del estrato analizado.

En los tres primeros casos se considera que solo la carga en punta provoca asentamientos, mientras que la Propuesta de Norma trabaja con la carga total (Q_t). Trabajos realizados en este sentido [Ibáñez (1999)] demuestran la similitud de los resultados aplicando el método de Vesic (1977) y la Propuesta de Norma (1989).

e) Métodos teóricos: se basan en expresiones clásicas relacionadas con el cálculo de las deformaciones en el interior del semiespacio elástico, homogéneo e isótropo, producto de una fuerza P .

f) Métodos aproximados: se determinan los asentamientos con el uso de expresiones matemáticas, similar a las cimentaciones superficiales, solo que se tiene en cuenta la variación del estado tensional en el interior del semiespacio homogéneo, isótropo y lineal.

Tabla1.2. Tabla resumen de fórmulas para el cálculo de cimentaciones sobre pilotes.

Método	Autor	Expresión
Métodos empíricos	Meyerhof Aschenbrenner y Olson	$S = \frac{D}{30 * F}$ $S = 0.01 * D$
Los procedimientos elásticos		$S = \frac{P}{D * E_s} * I_0$
	Vesic	$S = Ws + Wpp + Wps$ $Ws = (Q_{punta} + Q_{fricción}) * \frac{L}{A_p * I_p}$ $Wpp = \frac{Q_{punta}}{D * qp} * Cp$ $Wps = \frac{Q_{punta}}{D * qp} * Cs$
Métodos experimentales	Borland, Butler y Duncan Whitaker y Cooke Kezdi La propuesta de norma	$S = 2 * q * db * \frac{1 - v^2}{Es} * Ip$ $S = \frac{Kl * qb * db}{Es}$ $S = \frac{db * qb}{Es} * (I_1 + I_2 + I_3)$ $S = \frac{\sum_{i=1}^n H}{6} * (\epsilon_s + 4 * \epsilon_c + \epsilon_i)$

1.2.3 Cálculo de asentamientos en grupos de pilotes

Anteriormente se pueden apreciar diferentes métodos para el cálculo de asentamientos de cimentaciones sobre pilotes, aquí se presenta un ejemplo de ello.

En este caso se sustituye el grupo de pilotes por una cimentación ficticia, y se aplica una de las soluciones anteriormente analizadas. En este sentido se han desarrollado dos enfoques, uno en que el cimienta equivalente coincide con las dimensiones en planta del grupo de pilotes a una

profundidad de cimentación igual a la longitud del pilote si se considera trabajo en punta o a la mitad de esta longitud si los pilotes son flotantes [Das (1999)]. En el segundo enfoque las dimensiones en planta del cimiento equivalente dependen de la forma de trabajo de la cimentación y el tipo de suelo [Propuesta de Norma (1989)].

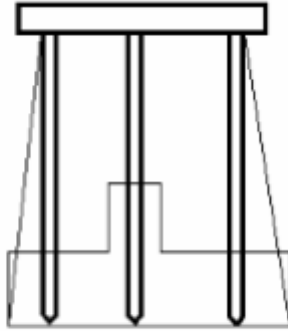


Figura I: Cimiento superficial equivalente.

En este sentido podemos mencionar los trabajos de Terzaghi y Perck (1967), los de Tomilson (1977), la Propuesta de Norma (1989) y Randolph (1994). En el caso de los primeros se utiliza la siguiente expresión para el cálculo de los asentamientos:

$$\Sigma f(x) = \sum_{i=1}^n \frac{Cci}{(1+e_0)} * \log\left(\frac{P_{oi}^i + \Delta P_i}{P_{oi}^i}\right) * \Delta Z_i \quad \text{Ec. (1.4)}$$

donde:

Ci- coeficiente de compresibilidad del estrato analizado.

eo – Índice de poros del estrato analizado.

poi- tensión por peso propio

Δp_i – incremento de tensión por carga impuesta

ΔZ_i – Espesor del estrato analizado.

Como se explica anteriormente, existen un gran número de métodos para la determinación del asentamiento del pilote, sin embargo, cada uno de ellos tiene génesis en diferentes hipótesis, por lo que en la mayoría de los casos son válidos para determinadas condiciones. Con la modelación matemática y la utilización de softwares potentes, se pueden agrupar muchas de las hipótesis anteriores, como el modelo de comportamiento del suelo, la magnitud de la carga que provoca asentamiento, así como el efecto del trabajo en grupo y se obtendrían los valores más veraces de asientos.

Para el cálculo del asiento absoluto de pilotes en grupos, según la Propuesta de Norma Cubana (1989) se supone que el mismo será igual al que alcance una cimentación equivalente, cuyas dimensiones y situación se muestran en la Figura (2). El asiento absoluto de esta cimentación equivalente se determinará igual que el de una cimentación superficial.

Cuando el espaciamiento entre pilotes sea mayor de $D + 2 \cdot \tan \alpha$ se calculará el asiento como pilote y como grupo de pilote, tomándose el mayor de los asientos calculados para compararlo con el asiento absoluto límite.

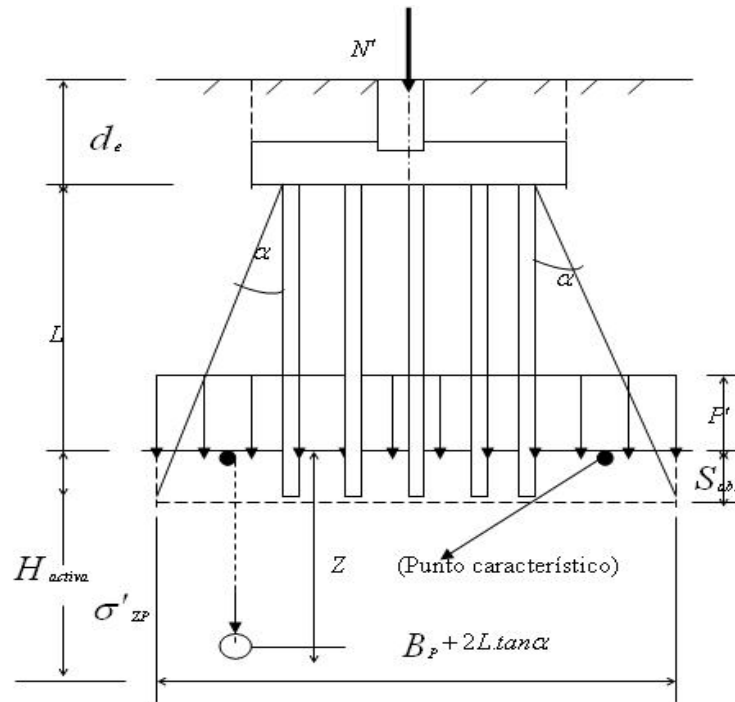


Figura 2.2 Cálculo de asientos de grupos de pilotes (resistentes en fuste, punta o ambos).

Una vez realizado el estudio de las expresiones para la determinación de las deformaciones podemos resumir que:

1. Existen diferentes criterios para la determinación de los asentamientos que se basan en expresiones teóricas o simplificaciones a soluciones más sencillas.
2. Cuando se cuenta con una detallada información de la hinca del pilote y las condiciones del lugar, se emplean metodologías con mayor grado de precisión en la determinación de la deformación del pilote.

1.3 Falla en grupo

Sowers (1977) define que la capacidad de carga del grupo se calcula suponiéndose que el grupo de pilotes forma una cimentación gigantesca, cuya base está al nivel de las puntas de los pilotes y cuyo ancho y largo son el ancho y el largo del grupo de pilotes. La capacidad del grupo es la suma de la capacidad de la base de la cimentación, más la resistencia a esfuerzo cortante a lo largo de las caras verticales del grupo que forma la cimentación. Este autor plantea que en ensayos en modelos indican que la capacidad del grupo es siempre ligeramente menor que la calculada, pero la diferencia está comprendida ampliamente dentro del factor de seguridad.

En determinadas condiciones puede ocurrir el fallo en grupo de la cimentación [Juárez (1969), Sowers (1977), la Propuesta de Norma (1989), Vam Impere (1998), Hansbo (1993)].

Para que ocurra el fallo en grupo debe cumplirse que:

- Espaciamiento / Diámetro (SP/D) < 3
- Cabezal apoyado al suelo
- Suelo casi homogéneo.

Sería necesario poder determinar el comportamiento del pilotaje visto como la trilogía pilote – encepado – suelo, ante esta situación evaluando el mecanismo de fallo que se genera tanto en las caras de la cimentación como en la base. Sin duda alguna solo un análisis espacial (3D) podría llevarnos a soluciones veraces.

1.3.1 Eficiencia de grupo

La eficiencia del grupo de pilotes (ξ) es la relación entre la capacidad del grupo Q_{grupo} , y la suma de las capacidades del número de pilotes, n , que integran el grupo:

$$\xi = \frac{Q_{\text{grupo}}}{n * Q_{\text{pilote}}} \quad \text{Ec. (1.5)}$$

Producto de la construcción del pilote se puede afectar el terreno, de forma que se compacte extraordinariamente (arenas flojas y medias) o que disminuya apreciablemente su consistencia (arcillas sensibles). Por esta razón varios autores [Jiménez (1986), Paulos y Davis (1980), Lee (1991)] plantean que la eficiencia de grupo en arcillas es de 0.8 y del orden de 1.5 en arenas

medias con igual espaciamiento. La capacidad del grupo aumentará con la separación entre pilotes, mientras que la capacidad individual, en arcillas no aumenta. En este campo podemos citar los trabajos de Vesic y Whitaker, Press (1933), Swinger (1941), Master (1943), Chellis (1962) entre otros.

Todos coinciden en que las invariantes a la hora de determinar la eficiencia del grupo son:

- El espaciamiento entre pilotes,
- El número de pilotes,
- El diámetro de los pilotes,
- La longitud de los pilotes,
- Las propiedades del suelo.

Para la obtención del valor de eficiencia de grupo, existe amplia bibliografía donde se expresan recomendaciones a partir de modelos y fórmulas empíricas. La siguiente tabla expone las expresiones utilizadas por cada autor.

Tabla 1.3 Valores para obtener el valor de la eficiencia de grupo.

AUTOR	EXPRESION
Sowers	$eg = 0.5 + \frac{0.4}{(n - 0.9)^{0.1}} ddd$
Tomás de la Torre	<u>Suelo Cohesivo.</u> ▪ Si $C_u < 100$ Kpa $eg = 0.59 + 0.55 \cdot \frac{espacentre.pilotes}{ladodel.pilote}$ ▪ Si $C_u > 100$ Kpa $eg = 1$ si espaciamiento / lado > 3 <u>Suelo friccional</u> $\xi = 1$
Converse- Labarre	$eg = 1 - \phi \cdot \frac{(n - 1) \cdot m + (m - 1) \cdot n}{90 \cdot m \cdot n}$
Propuesta de Norma	<u>Suelo Cohesivo</u> ▪ Si $C_u > 100$ Kpa $\Rightarrow \xi = 1$ ▪ $C_u < 100$ Kpa y $Sp/D > 3$ $eg = 1 - \frac{D}{\pi \cdot nf \cdot m} \cdot \left[m \cdot (nf - 1) + nf(m - 1) + \sqrt{2 \cdot (m - 1) \cdot (nf - 1)} \right]$

	<u>Suelo friccional</u> ▪ Pilotes hincados $\Rightarrow \xi = 1$ ▪ Pilotes "in-situ" y $S_p/D = 3 \Rightarrow \xi = 0.66$
--	--

De acuerdo con el ensayo de modelos, Sowers (1977) expone que las fallas en grupos de pilotes en arcillas ocurren a un espaciamiento de $1.75 \cdot D$ para grupos de 2 pilotes y $2.5 \cdot D$ para grupos de 16 pilotes, estando la eficiencia $\xi = 0.8 \sim 0.9$. Nishida (1961) encuentra que los pilotes son influenciados por los adyacentes si el espaciamiento es menos que $4 \cdot D$ en suelos cohesivos y $8 \cdot D$ en suelos no cohesivos. Otros autores que han desarrollado este tema son Kezdi (1957), Cambefort (1953) y Steward - Hanna (1961). La discrepancia en cuanto a la forma de obtener la eficiencia de grupo es evidente y se explica por el hecho de que las fórmulas son resultados de experimentos y toman varios valores empíricos. Es interesante por lo tanto comprobar la eficiencia calculada con los resultados de los ensayos de modelos de pilotes. En arcillas, las fórmulas empíricas parecen estar sorprendentemente en un estrecho acuerdo para espaciamiento y número de pilotes. Para grupos de pilotes en arenas y gravas, la aplicación parece dudosa.

Sin duda alguna la determinación de la eficiencia de grupo es un problema que encierra una gran complejidad ya que para su validación se requiere de realizar ensayos a escala real, lo que es muy costoso, más si se tiene en cuenta el número de casos posibles a ensayar. Aun así, una modelación matemática, o con la ayuda de softwares, necesariamente tiene que partir de un análisis espacial (3D) para poder evaluar la influencia real del pilote dentro del grupo de pilotes y el comportamiento del suelo que queda atrapado entre los pilotes, que en algunos casos se desorganiza (arcillas) o aumenta su compacidad (arenas). Por otra parte, y dentro de este proceso estará incluido, el fallo en grupo.

Los pilotes en suelos colapsables presentan una característica particular que la diferencia del resto. El fuste puede estar sometido a un proceso de rozamiento negativo producido por el asentamiento del suelo que lo rodea, generando una fuerza axial adicional que puede resultar en asentamientos adicionales. Grigoryan et al. (1973) proponen un método para calcular la capacidad de carga en estos casos, suponiendo que la falla se alcanza simultáneamente en la superficie del fuste y en la punta sin considerar los asentamientos que ocurrirán. Krutov (1984) observó que la capacidad de carga en pilotes en suelos colapsables puede ser calculada contemplando una fuerza adicional producto del colapso del suelo generadora de fricción

negativa. Redolfi (1993) propone utilizar el método de las funciones de transferencia considerando al pilote como una sucesión de elementos discretos y analizando en forma secuencial la evolución de cargas y asentamientos por colapso a medida que el suelo se satura. El método de diseño se centra en considerar que la acción de la carga por fricción negativa sea tal que los asentamientos se mantengan dentro de ciertos límites admisibles. La carga externa y la carga por rozamiento negativo es tomada exclusivamente por el fuste y el coeficiente de seguridad global lo provee la punta. De esta forma, se pretende que al actuar las cargas por rozamiento negativo estas sean tomadas por el resto del fuste, el cual moviliza toda su capacidad resistente para asentamientos pequeños de la cabeza del pilote.

1.3.2 Cargas de hundimiento

Normalmente los pilotes se agrupan para formar cimentaciones a las que se da continuidad mediante el encepado. Dicho encepado es un elemento estructural cuya misión es transmitir las cargas a los pilotes y no al terreno. De hecho, su apoyo al terreno será débil o inexistente debido a la elevada rigidez de los pilotes. La separación entre pilotes es una variable fundamental tanto para el comportamiento del terreno como para la distribución de cargas en el grupo. Dicha separación suele estar en el rango de 2.5ϕ a 4ϕ .

En pilotes hincados en arenas se ha observado una mejora de la resistencia al hundimiento debido a la compactación del suelo en las inmediaciones del grupo. El máximo efecto se observa para $s = 3.5\phi$. Para valores muy superiores ($s \gg 3.5\phi$) los pilotes se comportarán como aislados y la mejora por efecto grupo será despreciable. Para valores muy inferiores ($s \cong 2\phi$) queda poco suelo entre los pilotes y se pierde eficiencia.

El máximo efecto correspondería a:

$$Q_h^{grupo} = 1.25 \sum Q_h^i \quad \text{Ec. (1.6)}$$

Como en la práctica es difícil de garantizar esta eficiencia, suele tomarse:

$$Q_h^{grupo} = \sum Q_h^i \quad \text{Ec. (1.7)}$$

En el caso de pilotes de extracción en arenas la descompresión del terreno puede dar lugar a una disminución de la resistencia por fuste, lo que llevaría evaluar la carga de hundimiento del grupo como:

$$Q_h^{grupo} = 0.7 \sum Q_h^i \quad 2\phi \leq s \leq 4\phi \quad \text{Ec. (1.8)}$$

En suelos arcillosos, independientemente de la forma de ejecución, se produce remoldeo de la arcilla lo que suele reducir la eficiencia del grupo de pilotes. Normalmente se puede expresar como:

$$Q_h^{grupo} = \eta \sum Q_h^i \quad \text{Ec. (1.9)}$$

en la que η recibe el nombre de coeficiente de eficiencia. Dicho coeficiente se puede calcular como (Coeficiente de grupo de Los Ángeles):

$$\eta = 1 - \frac{\beta}{\pi} \left(\frac{m(n-1) + n(m-1) + \sqrt{2}(m-1)(n-1)}{m*n} \right) \quad \beta = \arctg\left(\frac{\varphi}{2s}\right) \quad \text{Ec. (1.10)}$$

en la que m es el número de pilotes por fila y n es el número de pilotes por columna del grupo. En el caso de arcillas, para separaciones pequeñas ($s < 2\varphi$) no debe descartarse la posible rotura en bloque del grupo como si de una cimentación semiprofunda se tratara. En este caso puede llegarse a:

$$Q_h^{grupo} < 0.65 \sum Q_h^i \quad \text{Ec. (1.11)}$$

lo que normalmente requeriría de un cálculo en presiones de hundimiento suponiendo rotura global del conjunto (cimentación superficial con planta la del grupo y empotramiento igual a la profundidad de los pilotes).

En el caso de grupos de pilotes en roca se puede llegar a separaciones pequeñas de hasta $s = 1.5\varphi$ sin reducción de las cargas de hundimiento.

1.3.3 Análisis de grupos de pilotes mediante zapatas equivalentes

En algunos casos especiales (ya se ha mencionado el caso de grupo de pilotes en arcilla con separaciones pequeñas) es posible un mecanismo de rotura global del grupo de pilotes. Normalmente, esta situación implica la necesidad de comprobaciones adicionales por el posible colapso. Estas comprobaciones tienen puntos en común con las comprobaciones planteadas en cimentaciones superficiales.

A continuación, se presentan algunos de estos casos:

Capas blandas profundas encima y debajo de capa dura de pequeño espesor: Un grupo de pilotes con la punta en dicha capa dura puede provocar la rotura por punzonamiento de dicha capa dura.

Puede plantearse un punzonamiento en dicha capa dura

Se puede transmitir la tensión hacia las capas blandas con un ángulo de 30° en el caso de roca o terreno granular y 10° en el caso de arcillas.

Pilotes flotantes en capa más dura que una profunda más blanda: se puede transmitir la tensión hacia las capas blandas con planos divergentes empezando 5ϕ por arriba del plano de apoyo de los pilotes en el caso de arenas (mayor contribución por punta) o $1/3$ l desde dicho plano de apoyo en el caso de arcillas (mayor contribución por fuste).

En general el confinamiento es muy alto ($q = \gamma l$) lo que provoca que dichos mecanismos sean poco probables.

1.4 Fricción negativa

1.4.1 Fricción negativa en pilotes

El fenómeno de la fricción negativa puede describirse como la acción de una nueva carga a lo largo del fuste debido a la consolidación del suelo adyacente a la cara del pilote. Como los pilotes se moverán menos que el terreno circundante, este tenderá a “colgarse” de sus fustes, induciendo en aquellos unas tensiones que pueden considerarse producidas por un cierto rozamiento de signo contrario al resistente. Para esta situación la condición de diseño será:

$$N_{\text{pilote}} + Q_{\text{fricción negativa}} < Q_{\text{pilote}}$$

Este efecto se produce cuando el pilote está apoyado en roca y atraviesa un estrato muy compresible.

Ramón Barbey, considera que existe fricción negativa cuando se cumplen simultáneamente que: $2.50 < C_u < 22.5 \text{ Kpa}$ y $0 < \phi < 10$.

La Propuesta de Norma (1989) considera que la fricción negativa se produce en arcillas muy blandas ($C_u < 15 \text{ Kpa}$), cieno o relleno reciente que se consolida.

Para enfocar este problema se han desarrollado dos tendencias, una en que se tiene en cuenta el espesor del estrato consolidable, y otra tendencia donde se realiza un análisis evaluando el rozamiento ocurrido por la consolidación del suelo y el desplazamiento del pilote. Wong (1995) (1996)], Oteo (1992) y Jiménez (1994) hacen un detallado estudio sobre las condiciones y forma en que se genera la fricción negativa y qué espesor del estrato genera realmente fricción

negativa. Evidentemente, siempre que el suelo atravesado por los pilotes sea muy consolidable, la presencia de la fricción negativa ha de tenerse en cuenta. Sin embargo, los métodos vistos anteriormente definen el problema para diferentes condiciones de suelo (características mecánicas) sin tener en cuenta la posible relación entre la consolidación del suelo en el fuste y el desplazamiento del propio pilote, así como la consolidación debida a la disminución del manto freático. Ibáñez (2002) propone tener en cuenta que el valor de fricción negativa que se genera en las caras del pilote depende en gran medida de la deformación del mismo, del relleno existente (sobrecarga) y del suelo consolidable y recomienda determinar de forma independiente la deformación del pilote y la del estrato de suelo y obtener la profundidad a partir de la cual ambas deformaciones son iguales ($S_p=S_s$) y será esa la profundidad del estrato que generará fricción negativa.

La fricción negativa puede ocurrir en los siguientes casos:

- a) Un pilote hincado a través de una arcilla blanda sensible llega a un estrato relativamente incompresible. El remoldeo de la arcilla durante el hincado puede ser suficiente para causar asentamiento. Las arcillas blandas marinas o de estuario pueden ser particularmente susceptibles a desarrollar fricción negativa.
- b) Un pilote hincado a través de una arcilla blanda llega a un estrato relativamente incompresible con sobrecarga en la superficie. Normalmente una arcilla blanda que suprayace a una arcilla dura no tiene problemas. Sin embargo, la carga en la superficie producirá asentamiento que puede generar fricción negativa en el pilote. El drenaje de áreas pantanosas puede tener un efecto similar.
- c) Un pilote hincado a través de relleno recientemente colocado llega a un estrato compresible o relativamente incompresible. La fricción negativa resultará de la consolidación del relleno. En rellenos antiguos la fricción negativa disminuye o no existe.

Actualmente es imposible predecir con precisión la fricción negativa que se producirá en un pilote. Sin embargo, la máxima fuerza que se desarrollará por fricción negativa puede evaluarse si se asume la distribución de esfuerzos de fricción propuesta por Tomlinson (1987). Aunque dicho autor diferencia los casos entre estrato compresible e incompresible en la base, el mismo procedimiento puede emplearse en todos los casos con suficiente precisión.

Cuando se calcula la longitud requerida del pilote, la fricción negativa debe añadirse a la carga permisible. Los efectos de fricción negativa pueden reducirse o eliminarse si se protege la

sección del pilote dentro del relleno o de la arcilla blanda. Como alternativa se puede cubrir el pilote con una membrana plástica de baja fricción o con una capa de bitumen. Si se emplea bitumen debe tenerse mucho cuidado en su aplicación para asegurar que este se adhiere bien al pilote y tiene un espesor mínimo de 3 mm.

La fricción negativa es perjudicial porque:

- La carga de hundimiento se reduce.
- El estado tensional del pilote aumenta.
- Aumenta el asentamiento.

En situaciones donde el suelo alrededor de un pilote lo mueve hacia abajo, a esto se le denomina fricción negativa, esta fricción tiende a hundir el pilote y si este no puede penetrar más, en la punta del pilote se generará una presión concentrada. Este caso se puede presentar cuando se hincan pilotes en un estrato blando en cuya superficie se coloca un relleno que consolide el terreno, entonces este al consolidarse generará en las caras del pilote unas fuerzas de fricción que se denominan fricción negativa.

Aún en el caso en que la fricción negativa no induzca falla y sea resistida, fácil es comprender que su efecto es dañino pues ocupa una buena parte de la capacidad de carga del pilote que está soportando al suelo circunvecino y no carga útil.

Es fácil ver que, en una estructura piloteada con pilotes de punta, en la que se tenga el efecto de fricción negativa, un pilote de una zona interior de la cimentación podrá ser sobrecargado con un peso que sea como máximo igual al del volumen de arcilla tributario a dicho pilote. En un pilote de borde sin embargo la sobrecarga podrá ser mayor, por razones obvias y este efecto puede aún acentuarse más en un pilote de esquina teniéndose como límite únicamente el valor de la adherencia entre suelo y pilote a lo largo de todo el fuste del mismo. Por ello si el estrato resistente es susceptible de alguna cadencia el pilote de esquina será el que más asentamientos puede presentar, seguido de los de borde quedando los mínimos hundimientos en las zonas interiores del área piloteada. Esto da lugar a una distribución de asentamientos opuesta a la que se tendría en una cimentación por superficie flexible bajo carga uniforme. Si la cimentación tiene rigidez y los pilotes están sólidamente unidos a ella en su cabeza, el efecto diferencial de fricción negativa en las esquinas y bordes puede llegar a hacer que los pilotes en esas zonas trabajen a tensión en su parte superior.

El valor de la sobrecarga que por fricción negativa puede llegar a tener un pilote de punta tiene como cota superior el valor del producto de la adherencia entre suelo y pilote multiplicada por el área lateral de éste. En la práctica este valor de adherencia suele tomarse igual al de la cohesión del suelo. En pilotes interiores el cálculo anterior suele ser conservador y, como se dijo la sobrecarga no puede exceder el peso de la arcilla de un volumen tributario al pilote que puede ser evaluado con cierta aproximación por simples consideraciones geométricas.

L. Zeevaret (1992) ha hecho notar una consecuencia adicional a los efectos de fricción negativa cuya importancia práctica es quizás mayor de lo que a primera vista puede pensarse. Este efecto consiste en lo siguiente: al colgarse el suelo del pilote por fricción negativa, parte del peso que gravitaba en la zona de la punta del pilote sobre el estrato resistente se ha aliviado; si el estrato resistente es de naturaleza friccionante, esta disminución de la presión efectiva conlleva una disminución de la resistencia al esfuerzo cortante y de la capacidad de carga y, por lo tanto, propicia la penetración del pilote en el estrato de apoyo.

Los efectos dañinos en las estructuras vecinas, la pérdida de capacidad de carga útil por fricción negativa y los peligros que entraña la penetración diferencial de los pilotes en los estratos firmes, han hecho pensar en soluciones que permitan manejar a los pilotes de punta superando estos problemas, la pena de desecharlos como cimentación posible en lugares en que existe terrenos blandos y fricción negativa.

La primera solución de pilotes de control que se propuso se ilustra a continuación. Se trata simplemente de construir la cimentación de forma que los pilotes la atravesen libremente, de modo que no haya ningún contacto o unión entre ambos elementos. La estructura se carga entonces directamente contra el suelo, el cual comenzará a ceder bajo su peso. Esta presión hace que el suelo accione sobre los pilotes por un mecanismo de fricción negativa, con lo que éstos toman por lo menos parcialmente la carga de la estructura, con la correspondiente disminución de las presiones efectivas en el suelo blando; así, los pilotes originalmente separados de la cimentación llegan a trabajar con cargas importantes, haciendo además que los asentamientos de la estructura disminuyan grandemente.

La máxima carga hacia abajo producida por fricción negativa que se permite para propósitos de diseño puede calcularse asumiendo la distribución de esfuerzos. La fricción (o adhesión) en los

puntos A y B, que corresponden a las resistencias cortantes pico y residual del suelo respectivamente, serán:

$$f_A = \dot{a}c_p \text{ y } f_B = \dot{a}c_r$$

donde c_p y c_r son las resistencias cortantes pico y residual y $\dot{a}$ es un factor de adhesión, generalmente tomado como 1.

Luego la fuerza hacia abajo en el pilote causada por fricción negativa será:

$$\begin{aligned} & \left(\left(0.1H * \frac{1}{2} * \dot{a}c_p \right) + \left(0.1H * \frac{1}{2} * \dot{a}c_r \right) + \left(0.8H * \frac{1}{2} * \dot{a}(c_p+c_r) \right) \right) S \\ & = 0.45H * \dot{a}(c_p+c_r) * S \end{aligned}$$

Ec. (1.12)

donde S es la circunferencia del pilote.

El fenómeno de la fricción negativa consiste en una sobrecarga que debe resistir el pilote al “colgarse” un suelo consolidable en sus caras. La Propuesta de Norma (1989) define que la longitud que genera fricción negativa es la propia longitud del estrato del suelo compresible; sin embargo, Ibáñez (2002) expresa que para el cálculo de esta longitud se debe tener en cuenta la relación existente entre el desplazamiento o acortamiento del pilote y la consolidación del suelo. Concuero con este criterio, pues se demostró que, en efecto, para pequeños valores de deformación del pilote, todo el estrato genera fricción negativa; pero en la medida que aumenta la deformación del pilote producto de las cargas externas a las que está sometido, los desplazamientos de este serán mayores que los del suelo, por lo que el espesor que genera fricción negativa disminuye.

1.4.2 Fricción negativa por fuste. Carga de arrastre y movimiento por arrastre

Diversos documentos importantes han publicado mediciones de la distribución de carga que presentan pilotes instrumentados con énfasis en la carga de arrastre, por ejemplo, Bjerrum et al 1965y 1969; Darvall et al. 1969; Endo et al. 1969; Fellenius y Broms 1969; Fellenius 1972; Clemente 1979 y 1981; Bozozuk 1981, Leung et al. 1991).

El documento del registro del caso publicado por Endo et al. (1969) es un estudio de campo extensivo de carga de arrastre y movimiento por arrastre en pilotes y demuestra la interacción entre las fuerzas en el pilote, el asentamiento y la penetración de la punta del pilote. El artículo

presenta los resultados de mediciones en pilotes de tubería de acero, hincados, instrumentados, de 610 mm de diámetro y 43 m de longitud, así como los asentamientos de los pilotes y del suelo circundante durante un período de casi dos años (672 días). El perfil del suelo en el sitio consistió en un aluvión de gran espesor sobre un acuífero enterrado: una capa de 9 m de espesor de arena limosa seguido por limo hasta una profundidad de aproximadamente 25 m, sobre capas alternantes de limo y limo arenoso hasta una profundidad de 41 m seguido de arena. Dos pilotes fueron hincados con la punta cerrada y uno con la punta abierta. La resistencia a la penetración al final de la hinca fue baja, aproximadamente 20 mm para el último golpe. El nivel freático se encontraba a aproximadamente 1 m por debajo de la superficie del terreno. La presión de poros en el sitio fue afectada por el bombeo en la capa de limo inferior para obtener agua para una planta industrial, lo que creó un gradiente descendente en el sitio. La diferencia en términos de columna de agua entre el nivel freático y el estrato de arena a una profundidad de 40 m fue de aproximadamente 30 m. La consolidación subsiguiente de los suelos hizo que el suelo se asiente y se cuelgue de los pilotes, creando fricción negativa y movimiento por arrastre.

1.4.3 Cálculo de la carga de hundimiento cuando se produce fricción negativa

Cuando se produce fricción negativa, la carga de hundimiento de un pilote se calcula teniendo en cuenta la contribución por punta y la contribución por fuste.

Sea:

$$Q_h = Q_p + Q_f \quad \text{Ec. (1.13)}$$

la carga de hundimiento de un pilote (contribución por punta más contribución por fuste).

Eventualmente Q_f puede descomponerse en varios términos de acuerdo con las capas que se atraviesen. Por ejemplo:

$$Q_f = Q_{f_1} * l_1 + Q_{f_2} * l_2 + Q_{f_3} * l_3 + Q_{f_4} * l_4 \quad \text{Ec. (1.14)}$$

Pilotes columna:

Terreno estratificado en el fuste consolidando las capas 1 y 2 (las superiores).

$$Q_h = Q_p - Q_{f_1} * l_1 - Q_{f_2} * l_2 + Q_{f_3} * l_3 + Q_{f_4} * l_4 \quad \text{Ec. (1.15)}$$

Pilotes flotantes:

Terreno estratificado en el fuste consolidando las capas 1 y 2 (las superiores):

$$Q_h = -\frac{1}{2} * Q_{f_1} * l_1 - \frac{1}{2} * Q_{f_2} * l_2 + Q_{f_3} * l_3 + Q_{f_4} * l_4 \quad \text{Ec. (1.16)}$$

se supone despreciable la contribución por punta.

Motivo de la reducción por (1/2): al variar Q_f el pilote se asienta y no se puede movilizar todo el rozamiento negativo.

Pilotes flotantes:

Terreno homogéneo en el fuste consolidando. Suponemos que las tensiones tangenciales se invierten en $l/3$ y valen la mitad de la resistencia por fuste en esa zona, es decir:

$$Q_h = Q_f * \left(l - \frac{l}{3}\right) - \frac{1}{2} * Q_f * \frac{1}{3} \quad \text{Ec. (1.17)}$$

Motivo: al variar Q_f el pilote se asienta y no se puede movilizar todo el fuste en fricción negativa. Además, busca una situación de equilibrio con rozamiento positivo y negativo.

El esquema propuesto equivale a:

$$Q_h = Q_f * \left(l - \frac{l}{3}\right) - \frac{1}{2} * Q_f * \frac{1}{3} = Q_f * \left(l - \frac{l}{3} - \frac{l}{6}\right) = Q_f * \frac{l}{2} = Q_f * l - Q_f * 1/2 \quad \text{Ec. (1.18)}$$

1.5 Modelación matemática de las cimentaciones sobre pilotes

La modelación de la capacidad de carga de los materiales (en este caso el terreno) es un tema de la ingeniería ampliamente desarrollado, sin embargo, son innumerables los aspectos a tener en cuenta en el análisis del fenómeno.

Gran parte de los materiales que se utilizan por el ingeniero como el hormigón, los suelos, las rocas, o los denominados geomateriales, son de origen geológicos. Todos los materiales antes citados poseen características comunes entre las que se pueden destacar las siguientes [Darve (1980)]:

1. Se trata de materiales que presentan un dominio elástico muy reducido, apareciendo deformaciones irreversibles para valores de éstas del orden de 10^{-6} m.
2. Se producen deformaciones volumétricas cuando el material se somete a una tensión de corte pura. Estas deformaciones volumétricas varían a lo largo del proceso, siendo frecuente observar un primer dominio en el cual el material se contrae, seguido de otro en el cual se dilata (fenómeno de dilatancia). Finalmente, al producirse la rotura, la deformación volumétrica se anula.
3. Los fenómenos de la no linealidad y aparición de deformaciones irreversibles pueden describirse mediante la teoría de la elastoplasticidad, dependiendo de la tensión de plastificación y de la presión de confinamiento a que está sometido el material. Esta influencia puede llegar a cambiar el tipo de comportamiento del material, que presentará respuesta de tipo frágil cuando la presión de confinamiento es baja, y de tipo dúctil a presiones altas.
4. La rotura de estos materiales está frecuentemente caracterizada por la aparición de superficies de rotura que han evolucionado de bandas de cortante en las cuales se ha encontrado la deformación irreversiblemente y el daño en el suelo.

5. Finalmente, hay que destacar la importancia del acoplamiento entre el esqueleto sólido de estos materiales y el fluido intersticial, de forma que para su estudio se debe trabajar con el concepto de presión efectiva.

1.5.1 La modelación matemática y los métodos numéricos

Antes de profundizar en este tema se puede definir el concepto de modelación como "*simplificar o reducir el medio real a uno físico en el cual sea posible aplicar las ecuaciones constitutivas que gobiernan el problema. Se define como relaciones constitutivas las expresiones matemáticas de las leyes físicas que gobiernan el problema que se estudia*" [Jiménez (1994)]. La modelación es "el método de manejo práctico o teórico de un sistema por medio del cual se estudiará este, pero no como tal, sino por medio de un sistema auxiliar natural o artificial, el cual, desde el punto de vista de los intereses planteados, concuerda con el sistema real que se estudie. Es decir, es el método que opera de forma práctica o teórica como un "objeto", no de forma directa, sino utilizando cierto sistema auxiliar (natural o artificial) el cual se encuentra en una determinada correspondencia objetiva con el "objeto" modelado y está en condiciones de sustituir el "objeto" que se estudia en determinadas etapas de la investigación, permitiendo obtener determinada información susceptible de comprobaciones experimentales [Jiménez (1994)].

Si se conoce el comportamiento elemental del material del dominio, se necesitan procedimientos para extender tal comportamiento a todo el problema y resolver para las condiciones de contorno impuestas. Existen varias alternativas para dar este paso, cada una constituye un método (Analítico, Empíricos y Numéricos). Los métodos numéricos son aquellos en los que la solución analítica es inabordable por la complejidad matemática que requiere y que hoy en día con la ayuda del cálculo electrónico se tiene una respuesta rápida. Dentro de estos métodos se puede citar el Método de las Diferencias Finitas (MDF) y el Método de los Elementos Finitos (MEF).

Para el empleo de ambos métodos será imprescindible conocer los parámetros que definen el medio que se desea modelar como pudieran ser su geometría y la relación tensión – deformación. En el campo de la modelación matemática se destacan los trabajos desarrollados por León (1997) para el estudio de la interacción estática suelo - estructura, los de la ETS de Oviedo [Simanca (1999)] para el caso de cimentaciones superficiales y el modelo matemático desarrollado en el país para el caso de la hincas de pilotes [Sánchez (1982)].

En la bibliografía consultada Randolph (1994), Fernández (1998), Mata (1998), Gusmão (2000) entre otros acuden a la utilización del Método de los Elementos Finitos [Zinkiewics (1999)] y el comportamiento no lineal del suelo para la solución de problemas tensión deformación en diferentes obras geotécnicas y en el análisis del comportamiento de pilotes bajo el efecto de carga horizontal. Como tendencia mundial se aprecia la utilización de elementos deslizantes o interface para modelar la interacción entre la cara del pilote y el suelo. Los parámetros que caracterizan estos modelos suelen ser muy variables en función del tipo de obra y problema a resolver, para el caso de macizos rocosos Rivero (1984) y Soriano (1994) se acude a la fricción en la falla, mientras que para la interface suelo – acero o suelo – hormigón se recurre a valores empíricos que oscilan entre 1/2 o 2/3 de los valores obtenidos en el ensayo triaxial.

En la modelación del comportamiento real del suelo, las propiedades del mismo son obtenidas de ensayos que en lo posible tratan de reproducir el comportamiento del suelo en el estado de carga de la estructura real que se pretende estudiar. El resultado de estos ensayos muestra que el comportamiento del suelo es no lineal, dependiendo en gran medida de la presión de confinamiento que se tenga. De aquí la aplicación de modelos de comportamiento no lineal según Kondner (1963), Altaee y Brau (1997) cuyo uso viene unido a la aplicación del MEF.

La utilización de diferentes tipologías en las mallas utilizadas en la modelación es también un aspecto que se ha desarrollado en los últimos años con la utilización de análisis en tres dimensiones, sin la necesidad de recurrir a simplificaciones que se hacen en los actuales programas que analizan el estado tensional plano. Mestat (1994a, b) hace una excelente recopilación de las combinaciones de mallas utilizadas y su aplicación a cada problema práctico. Trabajos como los de Sales (1998a, 2000b), Oteo (1982), Mata (1998), Fernández (1998), entre otros muchos, se han desarrollado con la aplicación de programas computacionales con base en los diferentes métodos numéricos.

Con el impetuoso desarrollo de la industria de la computación y la programación se han desarrollado varios sistemas basados en diferentes métodos numéricos con grandes potencialidades para el análisis de los problemas tensión deformación en los suelos y la roca. Entre ellos podemos mencionar el FLAC (1996), que realiza un análisis en tres dimensiones, con base matemática en las diferencias finitas; el SIGMAW (1995) y el PLAXIS (1990), con base matemática en los elementos finitos, que realizan un análisis plano. Se debe señalar, además, el elevado precio en el mercado internacional de estos softwares.

En el trabajo se basará la modelación en un análisis plano, axial simétrico, teniendo en cuenta las recomendaciones anteriores, calibrando el modelo utilizado de acuerdo a los resultados a escala real y las normativas actuales. Para el caso de la modelación de los materiales, se considera un modelo de comportamiento elástico para el material que representa el pilote, elasto - plástico para el suelo, y un modelo deslizante o de interface para modelar la interacción pilote – suelo.

1.5.2 Dificultades para la modelación de los geomateriales

La correcta reproducción mediante modelación por computadora del comportamiento y condiciones de rotura, en estructuras en las que participan los geomateriales presenta una serie de dificultades importantes, entre las que se pueden mencionar:

1. Descripción del acoplamiento entre la fase sólida y líquida presente en los poros del material.
2. No linealidad de la respuesta del material, que depende del nivel actual de tensiones y deformaciones, de la historia de carga a que ha sido sometido, de la velocidad de aplicación de las cargas y de la dirección del incremento de carga.
3. La rotura se produce a volumen constante, por lo cual el material puede ser considerado como incompresible en estas condiciones. El acoplamiento del esqueleto sólido como el fluido intersticial en los casos en que la velocidad de aplicación de la carga es elevada, hace que aparezca el problema de incompresibilidad mucho antes de llegar la rotura.
4. La limitación del tamaño del problema a resolver hace necesario introducir en muchas ocasiones, condiciones inexactas, como ocurre por ejemplo al estudiar una presa, donde la malla se interrumpe en fronteras donde se supone que los desplazamientos son tan pequeños que pueden considerarse nulos.

A pesar de estas dificultades durante los últimos años se han incrementado y perfeccionado los métodos numéricos para el análisis de los medios discretos y continuos, destacándose para el análisis de estos últimos el Método de los Elementos Finitos y los de Diferencia Finita [Zinkiewics (1999)].

1.6 Ensayos a escala real

A través de ensayos a escalas reales se aprecian resultados que facilitan el trabajo con pilotes sometidos a fallo en grupo y fricción negativa. A continuación, se hace mención a una serie de autores que hacen referencia a estos fenómenos y sus conclusiones.

- Dustin Shaun Christensen (2006) en un ensayo a escala real de carga estática lateral en un grupo de 9 pilotes en arena propone: que cuando el ciclo de cargas es considerado dentro de las cargas laterales de un grupo de pilotes, la fuerza del suelo debe reducirse de 75 a 85 por ciento con respecto a la fuerza del suelo original.
- Jeffrey L. Snyder (2004) en un ensayo a escala real de cargas laterales de un grupo de pilotes 3x5, espaciados por un diámetro de 3.92 en arcilla blanda y cieno propone que en pilotes solos ocurre una progresividad de profundidad máxima de momentos curvos con el aumento de las cargas y en grupos de pilotes los momentos son similares a los de pilotes solos, en grupos de pilotes puntiagudos se produce mayor profundidad con el incremento de cargas.
- Juan Félix Rodríguez y Gabriel Auvinet (2011) en la modelación numérica del comportamiento de un pilote sometido a fricción negativa y cargas accidentales, concluyen que una parte importante de la fuerza generada por fricción negativa puede ser substituida por sobrecargas e inclusive la fricción negativa puede transformarse en positiva y se confirma que, para el diseño de pilotes, resulta exageradamente conservador sumar el efecto de la fricción negativa con el de las cargas accidentales.
- Tho X. Tran, Tam M. Nguyen (2003) en el análisis de fricción negativa en pilotes de concreto en subsuelo blando, concluyen que la fricción negativa causa fuerza hacia abajo que incrementa la carga en el eje del pilote y reduce la capacidad del pilote en suelo blando.

1.7 Conclusiones parciales

Después de realizado el estudio de los anteriores epígrafes, se arriban a las siguientes conclusiones:

- El efecto del trabajo en grupo y la fricción negativa son aspectos importantes para el diseño de grupos de pilotes.
- Existen diferentes criterios para asumir en qué condiciones se da el fallo en grupo, para el caso del análisis de la fricción negativa, la mayoría de los autores solo tienen en cuenta las propiedades del suelo y no evalúan la relación de desplazamiento pilote suelo.
- Aunque es limitado, existen ensayos de carga a escala real de grupos de pilotes.
- A través de la modelación matemática se pueden modelar los fenómenos del trabajo en grupo y fricción negativa

Capítulo 2

Capítulo 2. Estudio del trabajo de grupos de pilotes y fricción negativa en cimentaciones sobre pilotes

2.1 Introducción

En este epígrafe se realiza el análisis de los softwares (Plaxis 3D versión 1.6, 2D versión 8.6; y el geo5 versión 2016) utilizados para la modelación de pilotes, y de modelos propuestos para el análisis de la fricción negativa y el fallo en grupo a través del método de los elementos finitos (MEF).

2.2 Análisis de los softwares para la modelación de cimentaciones sobre pilotes

Para la realización del trabajo se utilizan 2 softwares, el Plaxis 2D – 3D y el Geo 5, ambos de demostrada eficacia en la solución de problemas relacionados con la geotecnia y con bibliotecas de cálculo específicas para pilotes.

2.2.1 Programa Plaxis 2D (versión 8.6) y 3D (versión 1.6)

El programa PLAXIS ha sido creado en la universidad Técnica de Delft, a partir de una iniciativa del Departamento de Trabajos Públicos y Dirección del Agua, en el año 1987. El objetivo inicial fue el desarrollo de un código de fácil uso basado en elementos finitos para el análisis de diques contruidos sobre las capas de suelo blando que forman el subsuelo de Holanda. En los años siguientes el programa PLAXIS ha sido ampliado para cubrir la mayor parte de las áreas de la ingeniería geotécnica. Debido al crecimiento continuo de las actividades se formó la compañía PLAXIS BV en el año 1993 (PLAXIS Manual, Versión 7. PLAXIS B.V. – University of Stuttgart, 1998).

El sistema Plaxis, permite analizar en 2D y 3D problemas geotécnicos, fundamentalmente relacionados con cimentaciones, presas de tierras y tabla estacas. En el mismo se pueden modelar problemas de capacidad de carga estados tensionales y deformacionales, incluyendo una biblioteca de materiales que describen fundamentalmente el comportamiento del suelo, el hormigón y el acero. En este sistema es de destacar que el mallado es autogenerado por el mismo, y el usuario, puede en función del problema analizado densificar la malla, lo que se traduce en mayor precisión en los cálculos y requerimiento computacional. (Leiva 2010)

Como se ha comentado anteriormente, el programa PLAXIS fue concebido inicialmente para el análisis de diques construidos sobre las capas de suelo blando que forman el subsuelo de Holanda. Actualmente, las aplicaciones de PLAXIS engloban la mayoría de los problemas de ingeniería geotécnica, tanto de mecánica de suelos como de mecánica de rocas.

El programa PLAXIS es recomendado para problemas de excavaciones subterráneas, análisis de la tensión y deformación del suelo sometido a grandes cargas drenadas y no drenadas, y problemas de flujo acoplado.

PLAXIS permite el estudio de una gran variedad de modelos constitutivos:

- Modelo de elasticidad
- Modelo de Mohr – Coulomb
- Modelo del endurecimiento isotrópico (Hardening-Soil)
- Modelo del deslizamiento del suelo blando
- Modelo del suelo blando

Aunque las aplicaciones del programa en problemas de geotecnia parecen estar totalmente resueltos, en realidad no es así, ya que el programa ha sido desarrollado partiendo de la filosofía inicial del estudio del subsuelo sometido a grandes cargas y a grandes excavaciones subterráneas, incluyendo en todos ellos el problema de flujo y ofreciendo la posibilidad del análisis mediante diferentes modelos de comportamiento del terreno. De todos modos, PLAXIS es un programa que almacena gran cantidad de opciones para el estudio de cualquier tipo de terreno y de geometría.

2.2.2 Geo5 (versión 2016)

Grupo de pilotes. Cuando definimos un grupo de pilotes es necesario introducir la rigidez de la estructura, la cual entonces conduce al análisis y verificación de la estructura. La suposición básica es que para una estructura rígida todos los pilotes experimentan el mismo asentamiento, mientras que, para una estructura complaciente, cada pilote se deforma independientemente. Cuando se ejecuta el análisis, este cuadro también sirve para seleccionar la forma en la que el experimento se lleva a cabo. Para estructuras rígidas y compatibles el programa permite definir ubicaciones para pilotes individuales utilizando sus coordenadas. En este caso, se requiere la coordenada de cada pilote (en el sistema de coordenadas x e y) y la carga actúa en cada pilote introducido. Si la opción “Considerar influencia del rozamiento negativo (RN)” es configurada en

el "Método de análisis", entonces es también posible introducir la sobrecarga de superficie utilizando el cuadro "NF + RN" (Capa freática + Rozamiento Negativo). Para añadir (editar) pilotes se utiliza el cuadro de diálogo "Nuevo (Editar) pilote".

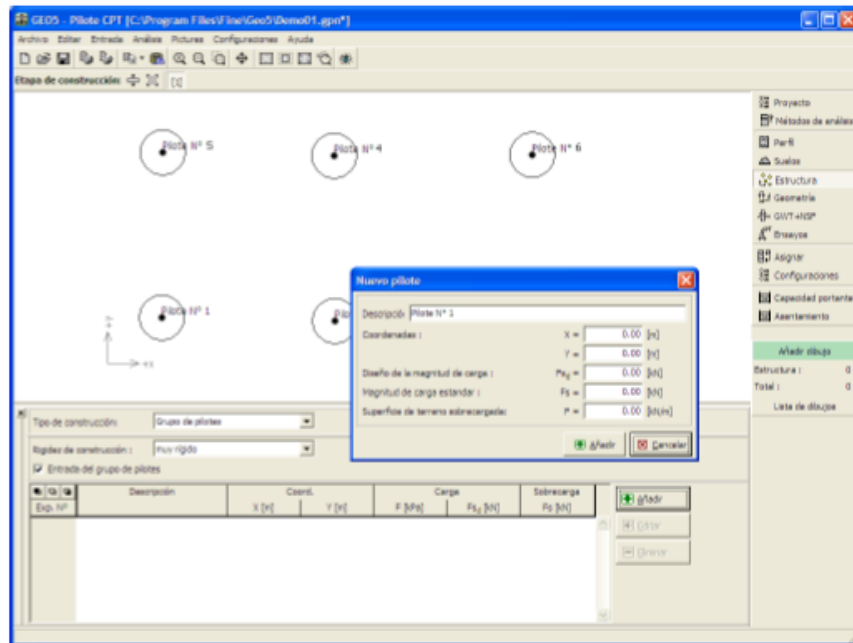


Figura 2.1 Cuadro "Grupo de pilotes" – ingreso de ubicación para pilotes utilizando sus coordenadas

Si el usuario no introduce las coordenadas de la ubicación del pilote, entonces sus parámetros son definidos directamente en el cuadro de la "Estructura". Seleccionando la estructura rígida se puede especificar el número de pilotes debajo de la estructura (los pilotes son entonces extendidos uniformemente).

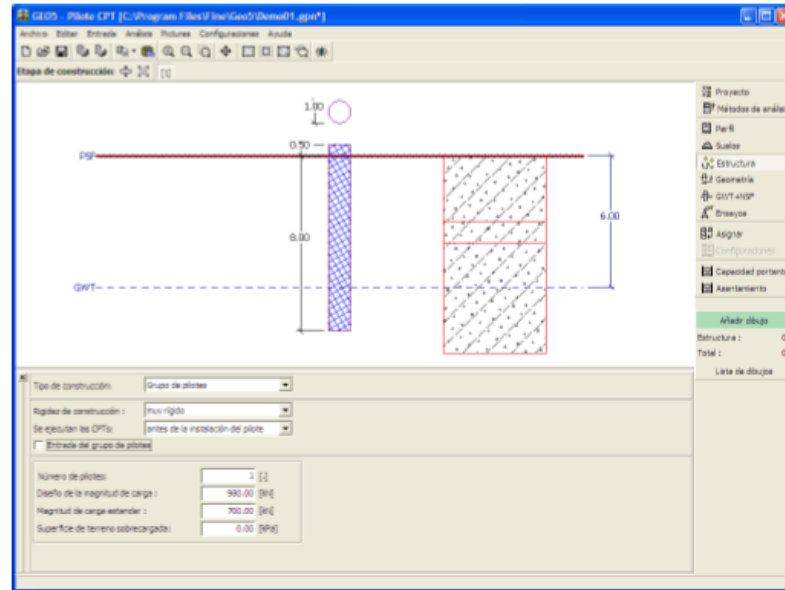


Figura 2.2 Cuadro “Grupo de pilotes”

2.3 Modelación por Elementos Finitos de cimentaciones en pilotes

La modelación por el Método de Elementos Finitos está pensada para ser usada en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complejas, este método se usa en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos. La variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, siendo el requisito básico que las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema a considerar sean conocidas de antemano. La metodología general a aplicar cuando se precisa obtener soluciones de dificultades en suelos, utilizando la modelación en una computadora consta de los siguientes 4 pasos:

1. Establecimiento de un modelo conceptual para el problema.
2. Establecimiento de un modelo matemático para el problema dado.
3. Construcción de un modelo de la simulación numérico para el problema.
4. El despliegue gráfico de los resultados numéricos obtenido de la simulación numérica.

El MEF permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio (medio continuo), sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral que caracterizan el comportamiento físico del problema, dividiéndolo en un número elevado de subdominios no intersectantes entre sí denominados «elementos finitos». El

conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se destacan una serie de puntos característicos llamados nodos, al conectarse varios nodos considerando sus condiciones de adyacencia y frontera se forman las denominadas mallas, cada uno de los retículos que conforman dichas mallas recibe el nombre de elementos finitos. Típicamente el método de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. El objetivo del análisis por medio del método de los elementos finitos, es determinar de forma precisa la respuesta de un sistema modelado con una cantidad finita de elementos y sujeto a unas cargas determinadas.

La solución obtenida por MEF es sólo aproximada, coincidiendo con la solución exacta sólo en un número finito de nodos. En el resto de puntos que no son nodos, la solución aproximada se obtiene interpolando a partir de los resultados obtenidos para los nodos, lo cual hace que la solución sea sólo aproximada debido a ese último paso.

Desde el punto de vista de la programación algorítmica modular las tareas necesarias para llevar a cabo un cálculo mediante un programa MEF se dividen en:

1. Pre proceso, en este paso se define la geometría del elemento que se desea estudiar y con ello se genera la malla, además en este proceso se asignan las propiedades a los materiales y otras características del problema se almacena junto con la información que describe la malla. Por otro lado, las fuerzas y las temperaturas se establecen a los puntos de la malla. A los nodos de la malla se les asigna una densidad por todo el material dependiendo del nivel de la tensión mecánica u otra propiedad. Las regiones que recibirán gran cantidad de tensión tienen normalmente una mayor densidad de nodos (densidad de malla) que aquellos que experimentan poco o ninguno. Puntos de interés consisten en: puntos de fractura previamente probados del material, entrantes, esquinas, detalles complejos, y áreas de elevada tensión.
2. Cálculo, en este proceso se obtienen resultados partiendo de las consideraciones realizadas en el Pre proceso, el cálculo generalmente se reduce a obtener el desplazamientos de los nodos y con ello el campo de desplazamientos aproximados el elemento finito, estando en presencia de un problema simple o no dependiente del tiempo la solución se obtiene generando un sistema de ecuaciones de N ecuaciones con N incógnitas, que puede ser

resuelto utilizando cualquiera de los algoritmos para la resolución de ecuaciones lineales. Si por el contrario estamos en presencia de un problema no lineal o dependiente del tiempo, el resultado puede ser obtenido mediante una sucesión finita de sistemas de N ecuaciones y N incógnitas que deben resolverse uno a continuación de otro, y cuya entrada depende del resultado del paso anterior.

3. Post proceso, dado que generalmente el MEF se aplica a casos de relativa complejidad, el programa da como resultado una gran cantidad de datos que es preciso organizarlos, graficarlos de forma tal que permita su comprensión más fácil, en el post proceso se calculan magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos, y en ocasiones se aplican operaciones de suavizado, interpolación e incluso determinación de errores de aproximación.

En la mayoría de los casos, el uso de un modelo complejo y muy refinado no es justificable, aunque este probablemente genere mayor exactitud computacional a expensas de un innecesario incremento en el tiempo de procesamiento. El tipo y la complejidad del modelo dependen sobre todo del tipo de resultados requeridos. Como regla general, un modelo de elementos finitos puede empezar con un modelo simple. Los resultados de este modelo sencillo, combinados con la comprensión del comportamiento del sistema, puede ayudar a decidir si es necesario refinar el modelo y en qué parte del mismo.

Para modelar el comportamiento real del suelo se utilizan propiedades obtenidas a través de ensayos realizados al mismo, para intentar obtener un modelo que represente de la forma más exacta el comportamiento del suelo en el estado de carga de la estructura que se quiere analizar, como consecuencias de estos ensayos se precisa que el comportamiento del suelo no es lineal. De aquí la aplicación de modelos de comportamiento no lineal según Kondner (1963), Altaee (1998) y Brau (1997) cuyo uso viene unido a la aplicación del MEF.

La utilización de diferentes tipologías en las mallas utilizadas en la modelación es también un aspecto que se ha desarrollado en los últimos años con la utilización de análisis en tres dimensiones, sin la necesidad de recurrir a simplificaciones que se hacen en los actuales programas que analizan el estado tensional plano.

2.4 Propuestas del modelo para el análisis del grupo de pilotes

Grupos de pilotes

Una de las pocas herramientas que existe para efectuar un análisis realmente tridimensional (3D) de la interacción entre una cimentación formada por un grupo de pilotes y el suelo, es el modelado numérico empleando el MEF 3D. Este tipo de modelo permite realizar el análisis y diseño de cimentaciones en las que los pilotes de borde y de esquina tienen una influencia importante en su comportamiento general.

Los principales inconvenientes para el desarrollo de un modelo 3D para la simulación de un grupo de pilotes, son que se requiere de una computadora con capacidad importante y que el tiempo de cálculo en ocasiones puede resultar impráctico. Debido a esto, el número de pilotes que pueden modelarse es limitado, ya que, de ser excesivo, el refinamiento de la malla será bajo y los resultados arrojados por el modelo serán poco confiables. Debido al tiempo requerido para la elaboración de las mallas y para la ejecución de los análisis, no es posible el desarrollo de estudios paramétricos muy elaborados.

El objetivo de este ejemplo es el de desarrollar un modelo 3D de una cimentación piloteada con dimensiones típicas de edificios. Asimismo, las deformaciones obtenidas se utilizan para la calibración del modelo analítico que se presenta más adelante.

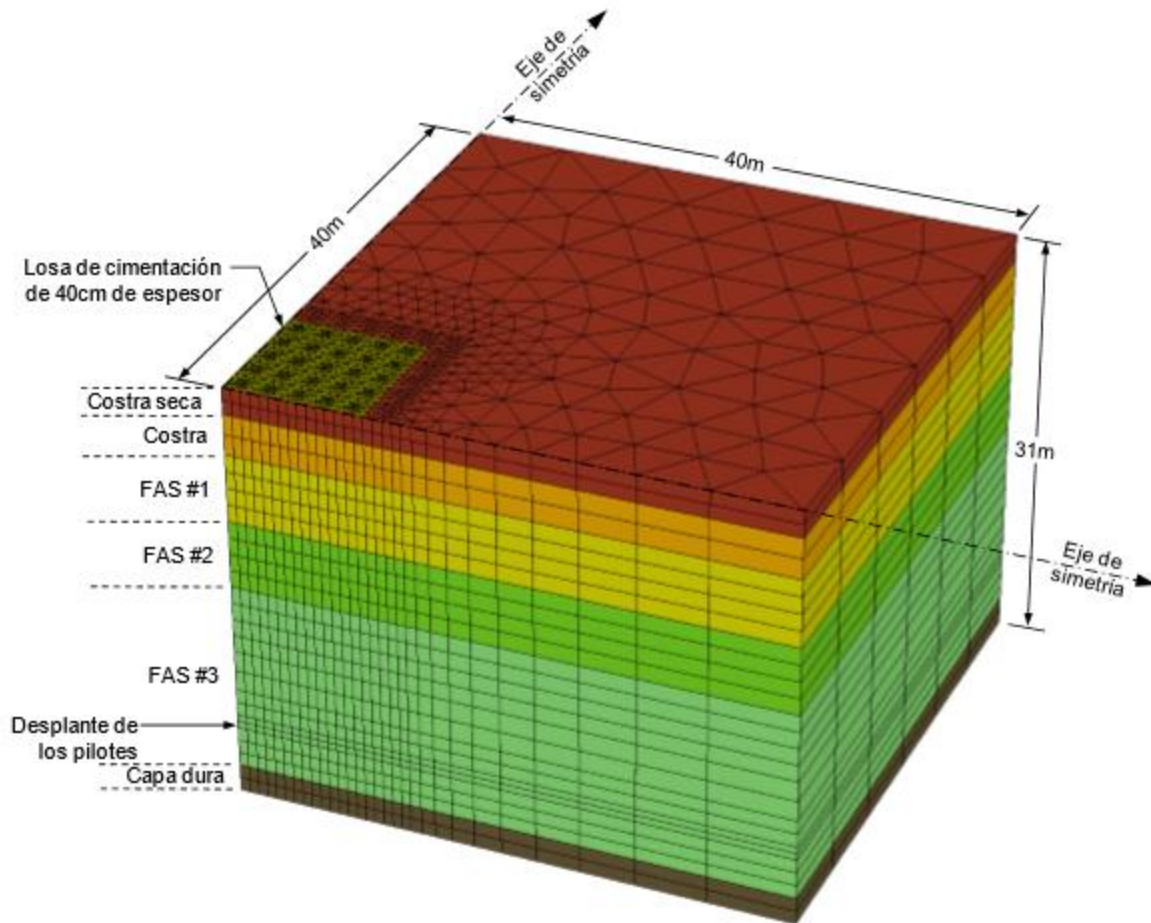


Figura 2.3 Vista general de la malla desarrollada para el caso de un grupo de pilotes

El modelo desarrollado considera una estructura con superficie en planta cuadrada de 20m de lado, representativa de edificios de 5 a 10 niveles que se ubican en la zona lacustre de la Ciudad de México [LÓPEZ, D. M. J. M. (2007)]. Se consideró un número total de 100 pilotes, distribuidos uniformemente y separados a cada 2m. Debido a la simetría del problema, fue posible analizar únicamente una cuarta parte de la superficie, por lo que en el modelo se consideraron solamente 25 pilotes, lo que permitió un refinamiento aceptable de la malla, como se muestra en las Figuras 2.3 y 2.4.

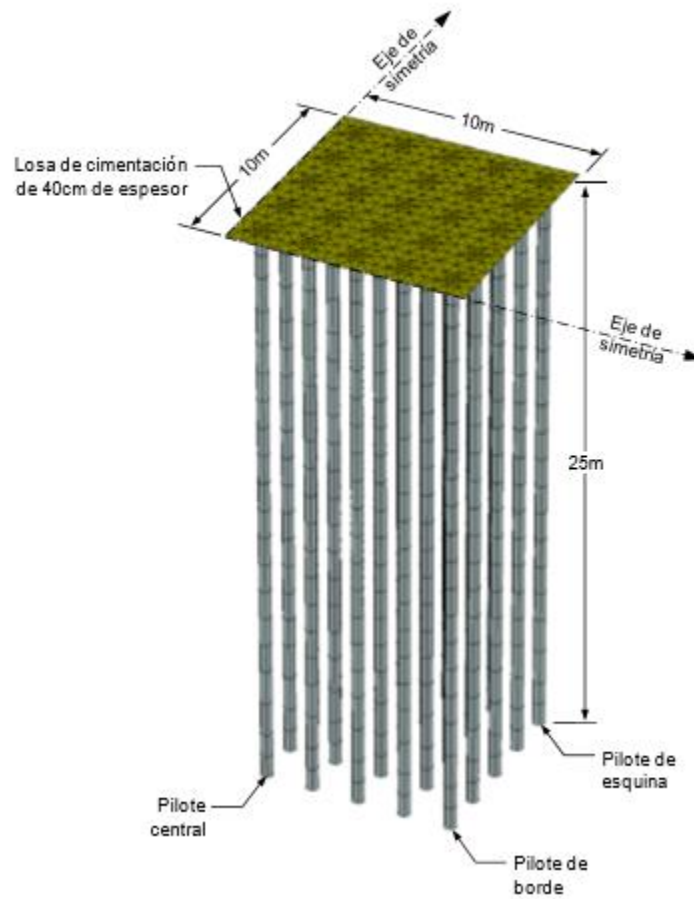


Figura 2.4 Detalle de la malla de los pilotes y de la losa de cimentación

Después de realizar un análisis de sensibilidad, se determinó que, para poder obtener resultados suficientemente precisos, se considera aceptable emplear elementos prismáticos triangulares de 15 nodos y refinar la malla a todo lo largo del fuste de los pilotes, alrededor de su punta y en el perímetro de la losa de cimentación. Se utilizaron elementos de interfaz únicamente en los pilotes de borde y de esquina. Para evitar influencia en los resultados, la frontera longitudinal se colocó a 40m del borde de la losa de cimentación, Figura 2.3. Las cuatro fronteras laterales se restringieron únicamente en dirección horizontal, mientras que la inferior se restringió en ambos sentidos. La losa de cimentación se simuló mediante elementos placa triangulares de seis nodos.

En la Figura 2.5 se presentan los perfiles de la variación con la profundidad de la carga axial transmitida por los pilotes de centro, borde y esquina, para las tres etapas del análisis. Para la Etapa 1, los pilotes de borde toman mayor carga que los centrales (1.4 veces ΣQ), mientras que los de esquina alcanzan valores de hasta 1.74 veces ΣQ . Debido a la rigidez de la losa de

cimentación, los esfuerzos transmitidos tienden a concentrarse en los bordes y, en mayor medida, en las esquinas.

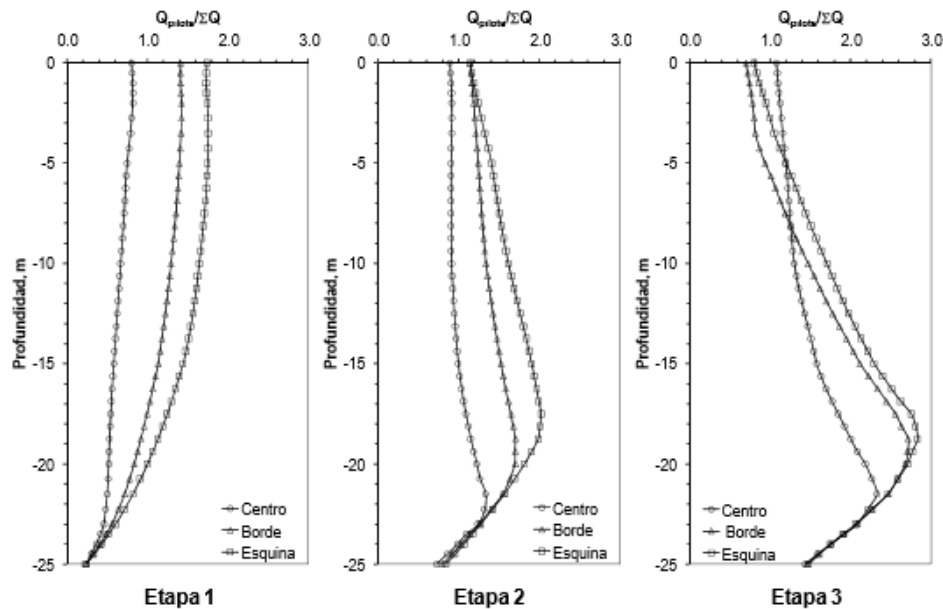


Figura 2.5 Carga axial en los pilotes de centro, borde y esquina, para las tres etapas del análisis

Para las Etapas 2 y 3, el hundimiento generado por el abatimiento piezométrico ejerce mayor influencia en el comportamiento de los pilotes de esquina que en los de borde y centro. Esto puede adjudicarse al hecho de que el área de influencia de estos es considerablemente mayor que la de los demás y, por tanto, es posible el desarrollo de mayor fricción negativa. En la Figura 2.6 b se observa una concentración de esfuerzos verticales generada por la fricción negativa en la parte inferior de los pilotes de borde y de esquina. Puede observarse también (Figura 2.6 a) que dicha concentración de esfuerzos genera flexión en los pilotes, que va disminuyendo paulatinamente para los elementos centrales de la cimentación.

Para la Etapa 3 (Figura 2.5) se aprecia relativamente poca diferencia en las cargas desarrolladas entre los pilotes de borde y de esquina, debido a que, como se ilustra en la Figura 2.7, se alcanzan condiciones límite para la fricción negativa en todos los pilotes que conforman la periferia del grupo. Para los centrales y los próximos a él, se presentan dichas condiciones únicamente en la punta. Esto nos indica que, si es posible el desarrollo de condiciones límite por fricción negativa en los elementos perimetrales, pero poco probable que se presente en los centrales, ya que en ningún análisis de los aquí expuestos se ha generado dicha condición.

Para evaluar la influencia de la rigidez de la losa de cimentación en el comportamiento de los pilotes de esquina, se varió su espesor (e) y se determinó la carga axial generada en estos elementos para las tres etapas de análisis, Figura 2.8 Para la Etapa 1 se observa que conforme se eleva el espesor de la losa, la carga transmitida por la cabeza de los pilotes se incrementa, alcanzado valores de hasta 2.4 veces ΣQ para $2e$. Para las Etapas 2 y 3, aparentemente la rigidez de la losa no tiene influencia en su comportamiento, ya que esta tiende a desplazarse de manera uniforme sin generación de hundimientos diferenciales de importancia, Figura 2.9.

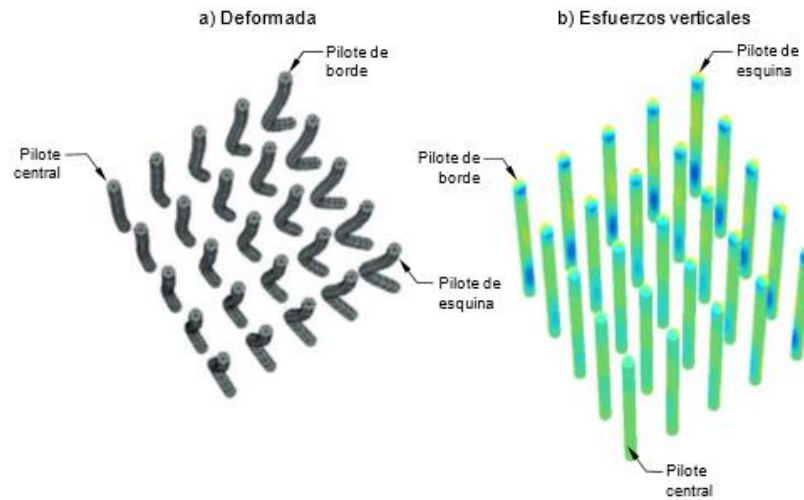


Figura 2.6 a) Malla deformada y b) esfuerzos verticales obtenidos para el grupo de pilotes (Etapa 3)

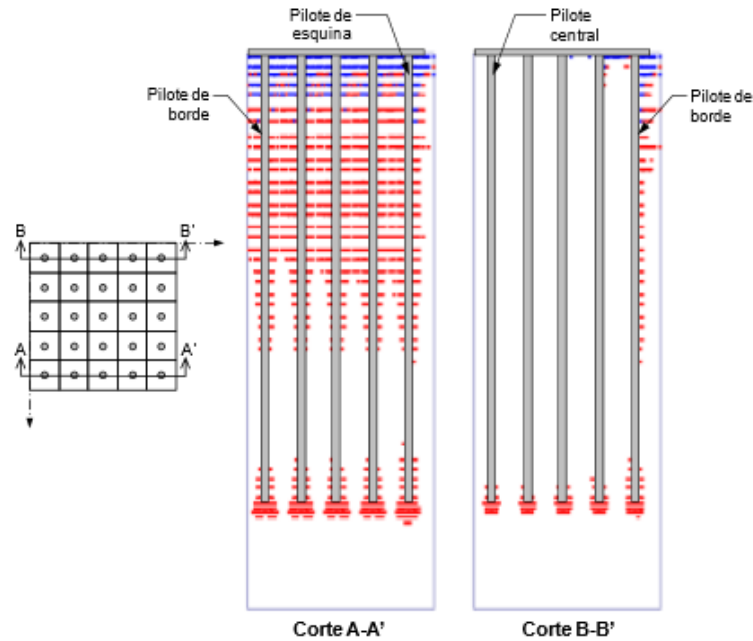


Figura 2.7 Puntos de plastificación obtenidos alrededor de los pilotes

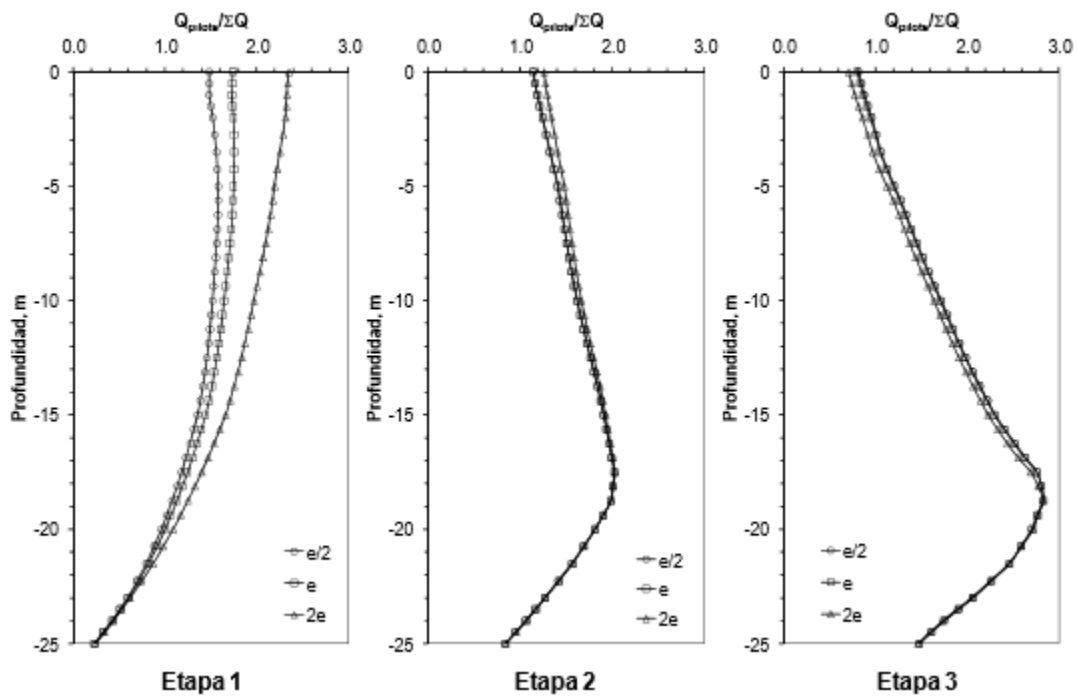


Figura 2.8 Carga axial en el pilote de esquina para distintos espesores (e) de la losa de cimentación y para las tres etapas del análisis

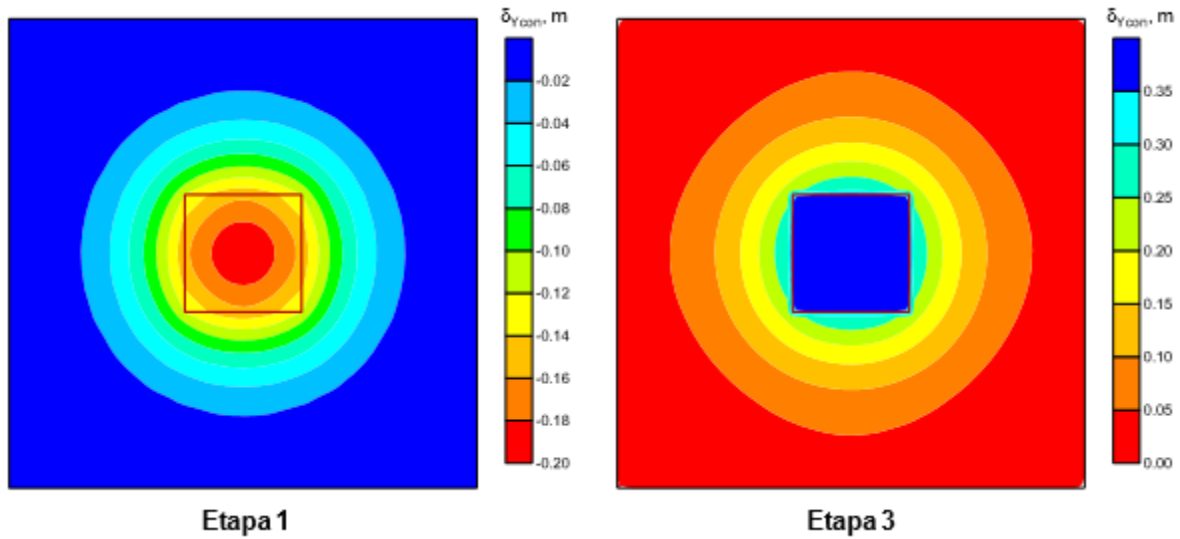
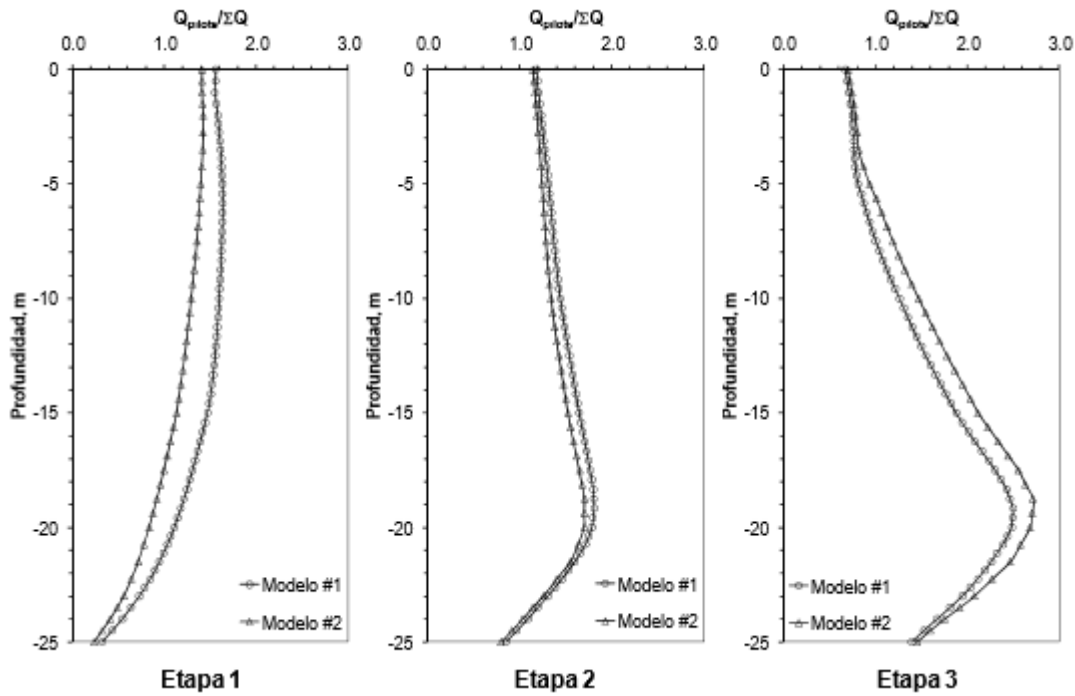


Figura 2.9 Curvas de isobaras de los asentamientos obtenidos para las Etapas 1 y 3

Por otra parte, en la Figura 2.10 se comparan las cargas axiales obtenidas en los pilotes de borde del modelo que considera una franja de longitud supuesta infinita (Modelo #1) con las obtenidas con un grupo de pilotes (Modelo #2). Puede observarse que las diferencias entre ambos modelos son relativamente pequeñas, lo que confirma lo obtenido en el inciso anterior: el comportamiento del pilote de borde es independiente de las dimensiones en planta de la cimentación.



Figura

2.10 Carga axial en los pilotes de borde para los modelos 3D, considerando una franja infinita (Modelo #1) y para un grupo de pilotes (Modelo #2)

2.5 Propuestas de un modelo para el análisis de la fricción negativa

Para el caso de la fricción negativa, esta no es más que una carga adicional a resistir por la cimentación al “colgarse” el suelo consolidable en las caras del pilote. Sin embargo, la mayoría de los enfoques evalúa la fricción negativa sin tener en cuenta la relación entre la consolidación del suelo y el desplazamiento o acortamiento del pilote, considerando que todo el espesor del estrato compresible genera fricción negativa

Con el objetivo de comprobar los resultados obtenidos para el caso de pilotes en suelos, se realiza la modelación por el programa PLAXIS del pilote aislado en un suelo homogéneo y del mismo pilote atravesando un estrato de suelo consolidable. A continuación, aparecen las principales pantallas con los datos y los resultados obtenidos. (Modelo en 2D y 3D)

Paso 1: Generación de la malla de elementos finitos: Se define las condiciones de frontera y los límites laterales e inferiores. El software genera automáticamente los elementos de la malla.

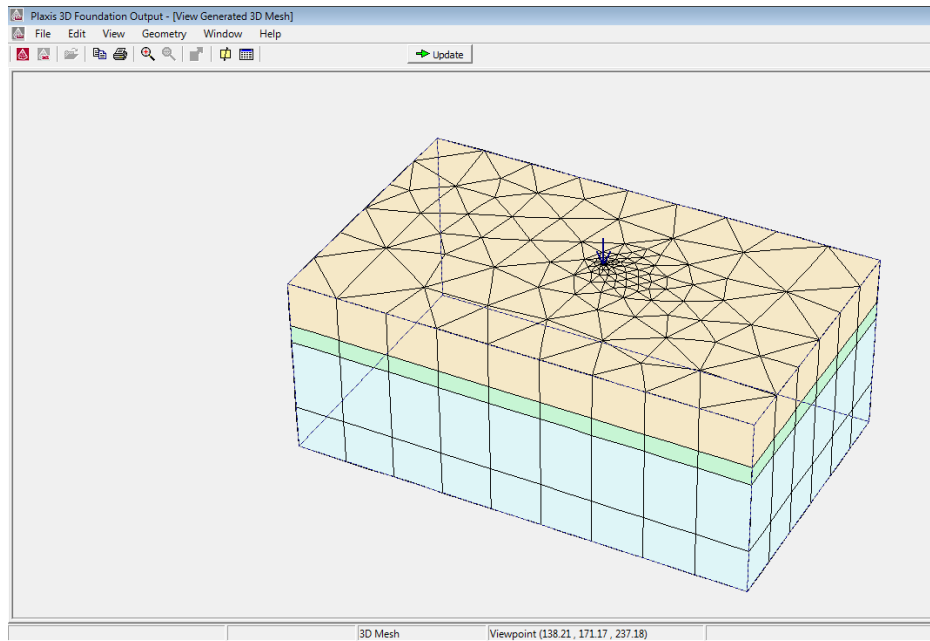


Figura 2.11. Malla de elementos infinitos 3D

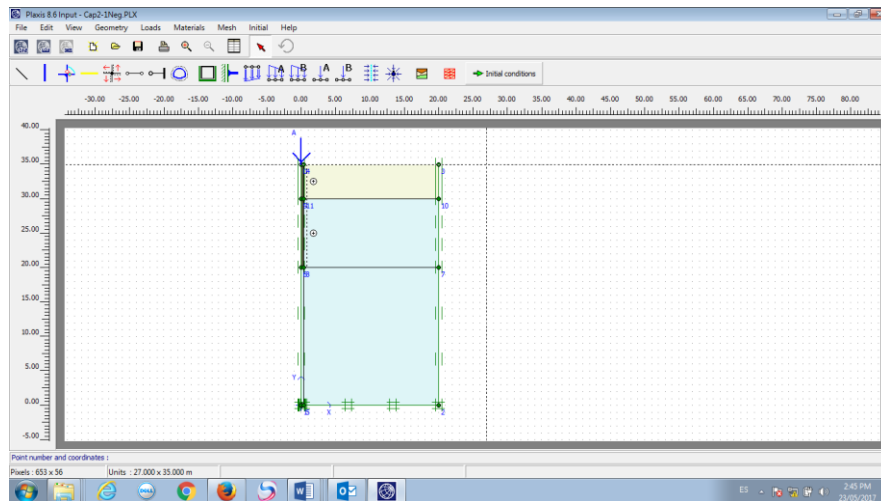


Figura 2.12 Malla de elementos infinitos 2D

Paso 2: Definición de las propiedades de los elementos que componen el sistema (Relleno, arcilla, roca y pilote)

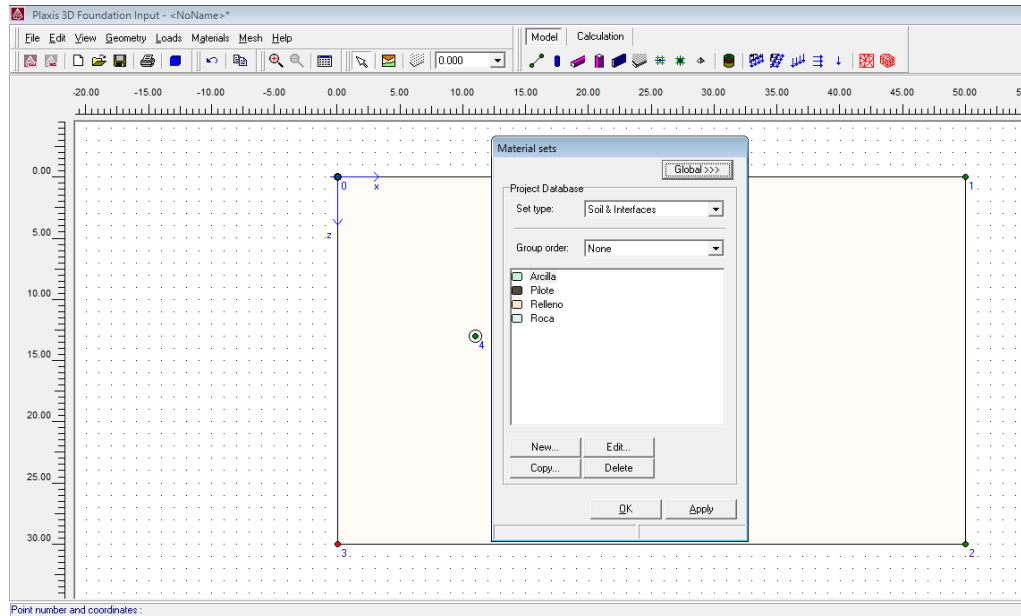


Figura 2.13. Materiales utilizados para modelar el suelo y el pilote

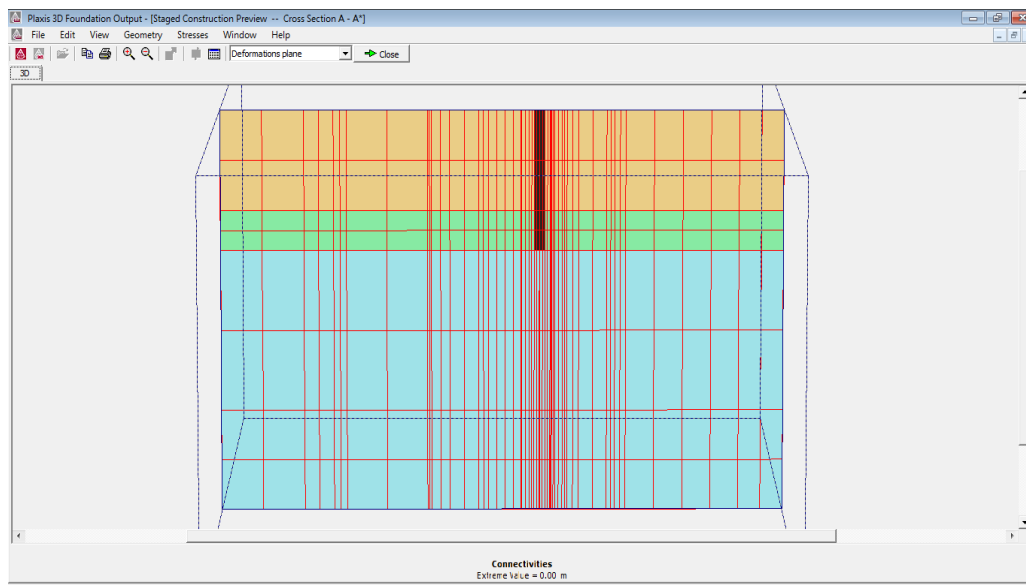


Figura 2.14. Corte donde se parecía el pilote en la masa de suelo

Después de realizar un análisis de sensibilidad, se determinó que, para poder obtener resultados suficientemente precisos, se considera aceptable emplear elementos prismáticos triangulares de 15 nodos y refinar la malla a todo lo largo del fuste de los pilotes, alrededor de su punta y en el perímetro de la losa de cimentación

Paso 3: Definición de la carga (valor y posición)

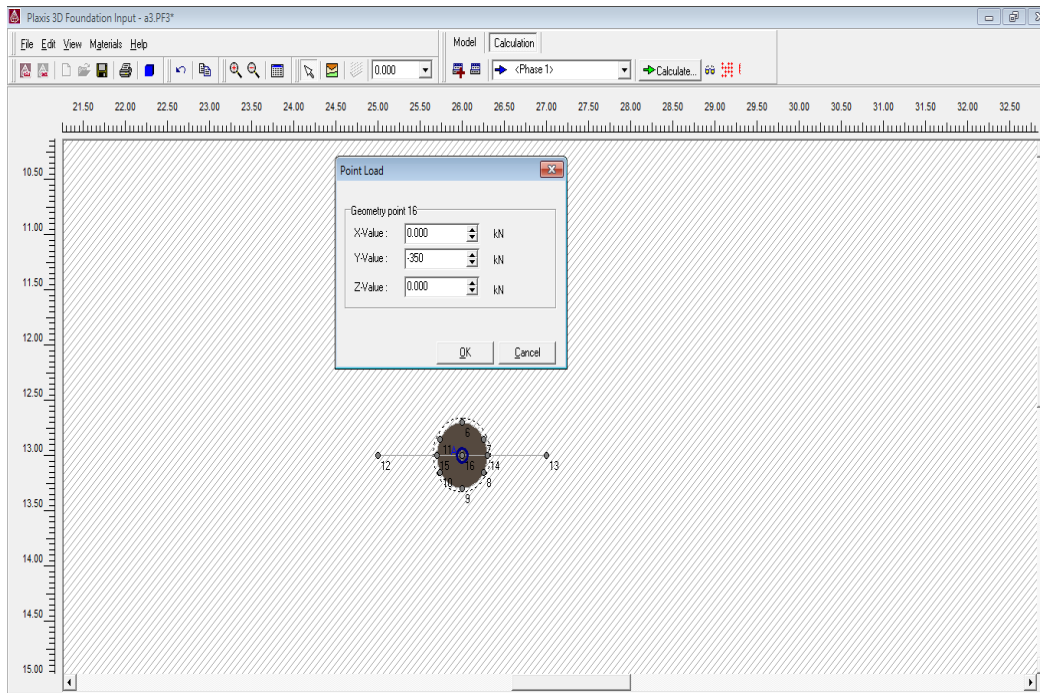


Figura 2.15. Carga aplicada al pilote

Paso 4: Definición del punto a monitorear en la curva carga deformación

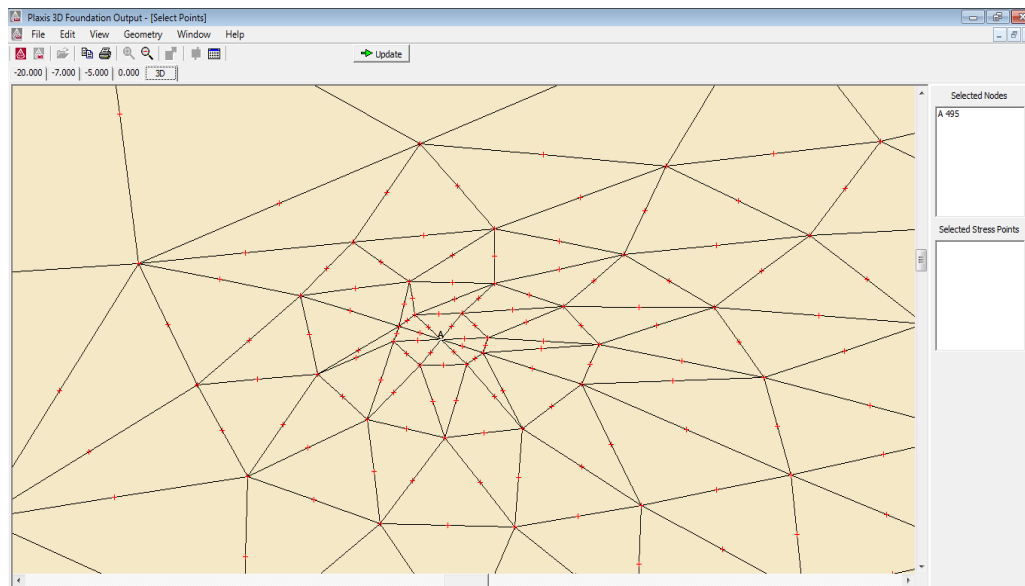


Figura 2.16. Definición del punto de control Carga vs deformación

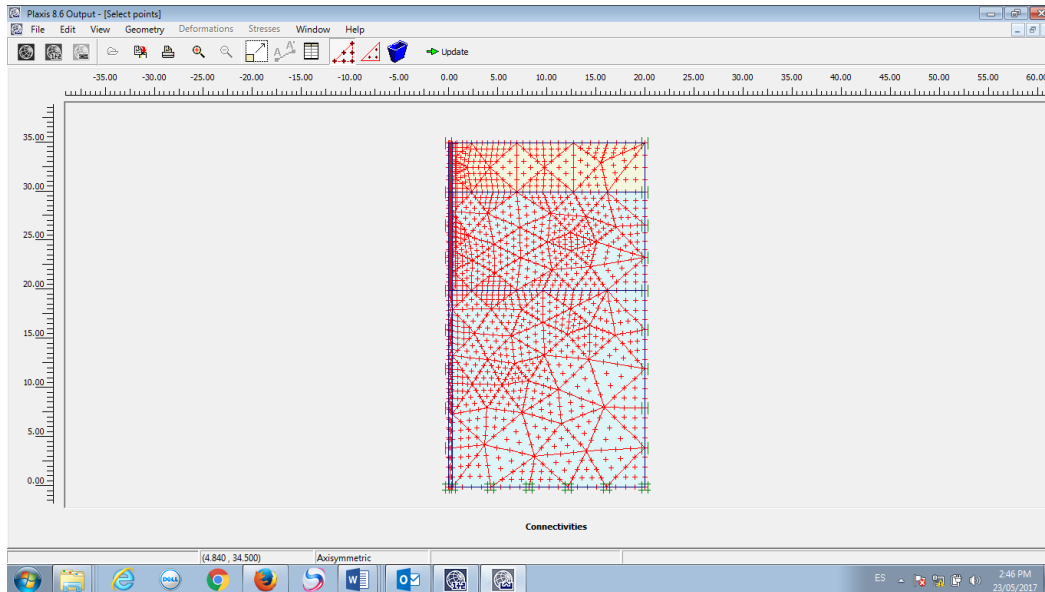


Figura 2.17 Definición del punto de control Carga vs deformación. 2D

Paso 5: Corrida del programa y obtención de la curva carga deformación

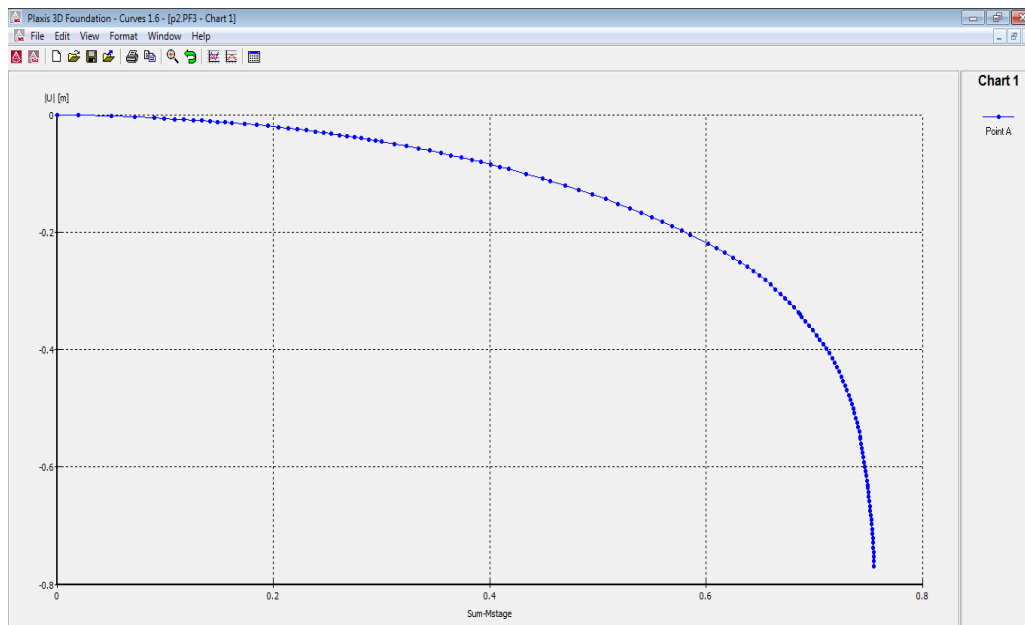


Figura 2.18 Curva carga deformación para una carga de 350 kN, pilote en suelo cohesivo puro
 $C = 60 \text{ kPa}$, $D = 0.4 \text{ m}$ y $L = 10 \text{ m}$. Modelo en 3D

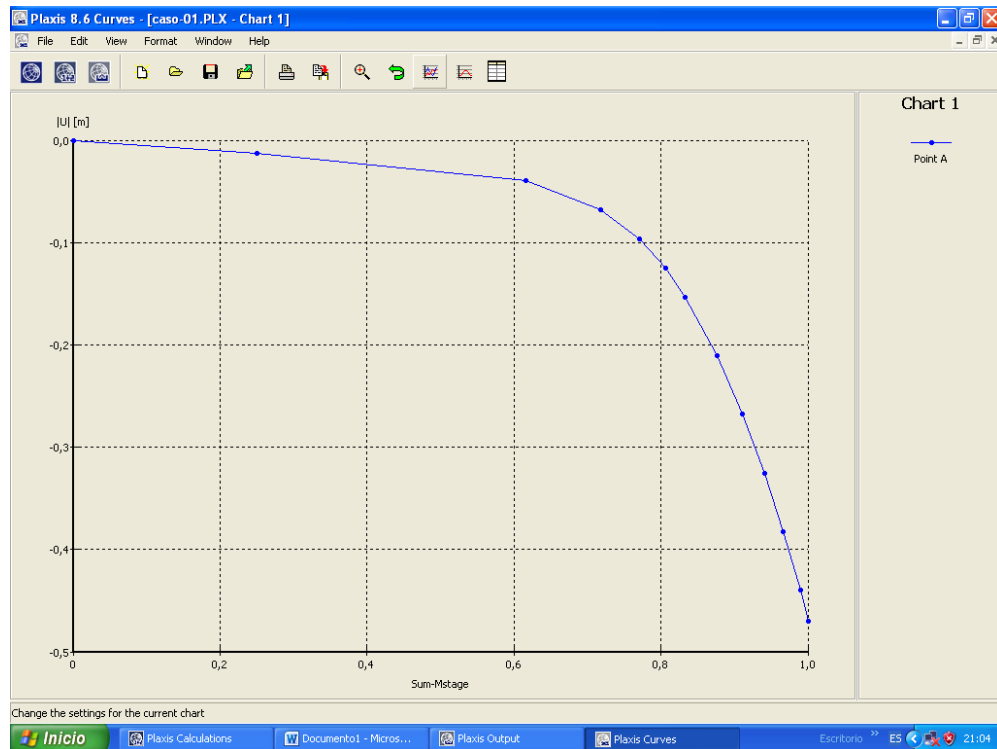


Figura 2.19 Curva carga deformación para una carga de 350 kN, pilote en suelo cohesivo puro $C = 60$ kPa, $D = 0.4$ m y $L = 10$ m. Modelo en 2D

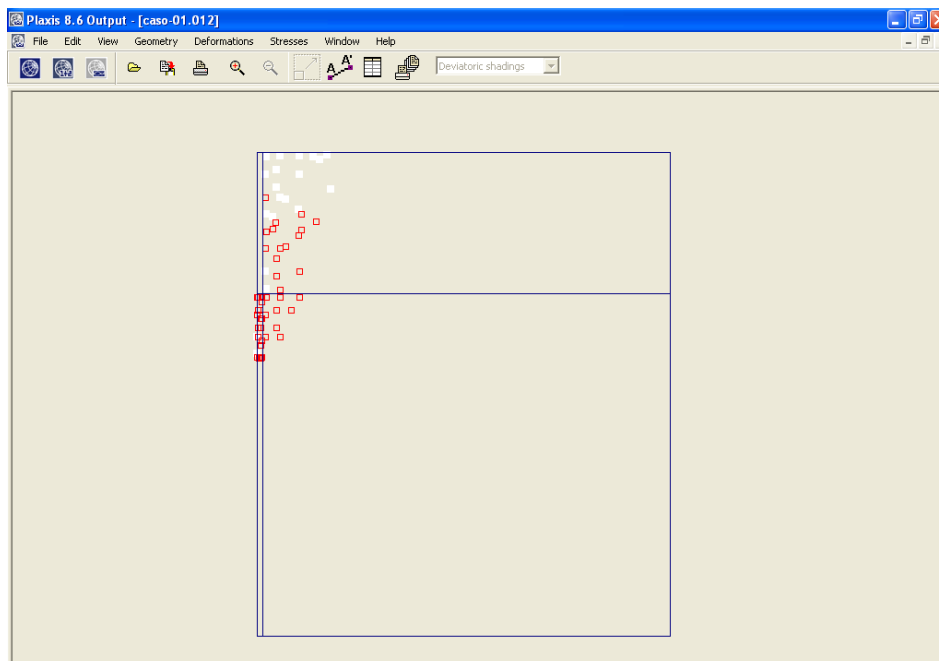


Figura 2.20 Puntos de Plastificación. Modelo en 2D

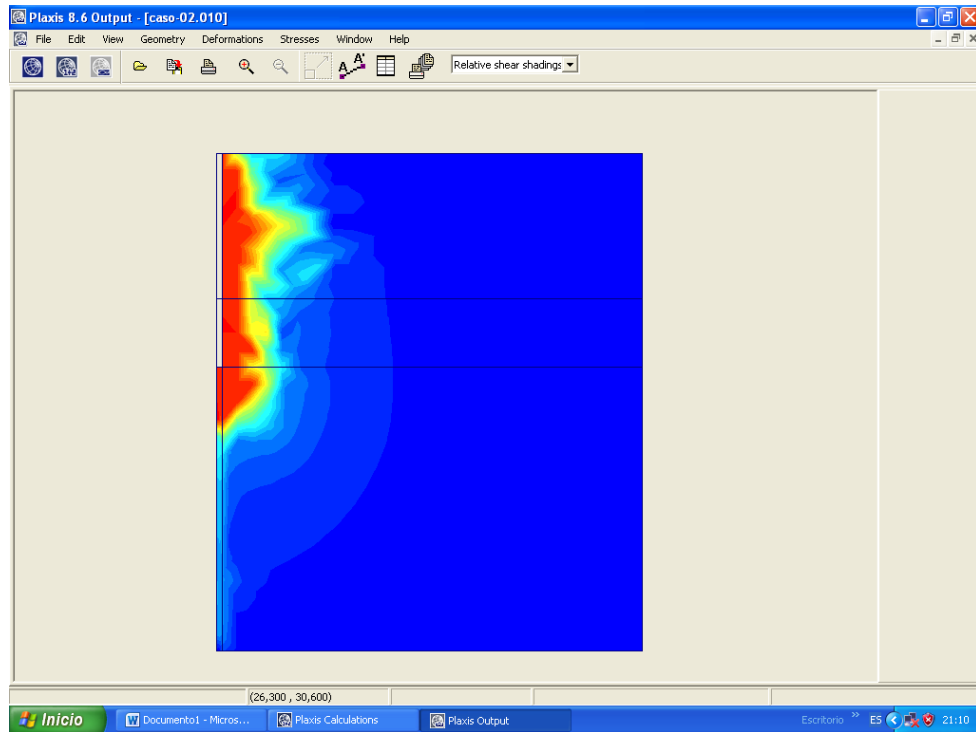


Figura 2.21 Estado tensional. Modelo en 2D

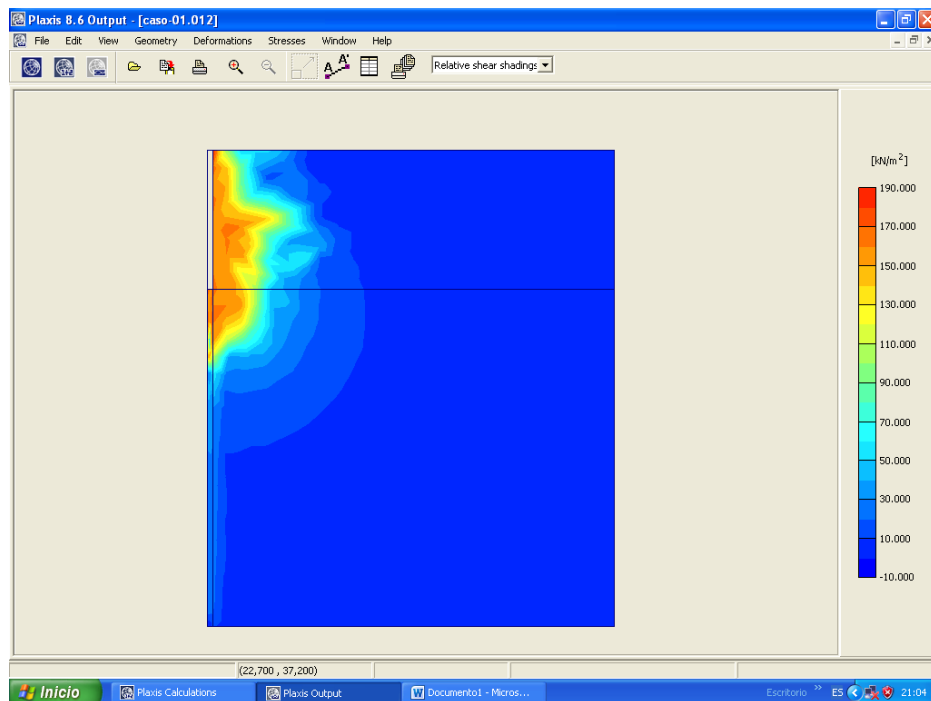


Figura 2.22 Estado tensional, tensiones tangenciales. Modelo en 2D

En la siguiente tabla se exponen los resultados obtenidos con el modelo en 2D, 3D y otros valores de la literatura consultada.

Datos del Pilote:

$L = 10$ metros

$D = 9.8$ metros

Material Hormigón

Datos del suelo

$C = 80$ Kpa

$E_o = 15000$ Kpa

Tabla 2.1 Capacidad de carga según diferentes normativas en KN

Plaxis 2D	Plaxis 3D	Norma Cubana	Caquot Kerrisel	Meyerhof
1500	1540	1456	2300	1700

Como muestra la tabla existe correspondencia entre los valores obtenidos por ambos modelos en 2D y 3D con otras normativas lo que ratifica la validez del empleo de este software para el análisis de cimentaciones sobre pilotes.

En el caso de la fricción negativa, a manera de ejemplo se analiza un caso donde el pilote atraviesa un suelo consolidable, para obtener la curva carga deformación. En este caso se considera un suelo de espesor 5 metros, $C = 5$ Kpa y $E_o = 2500$ Kpa

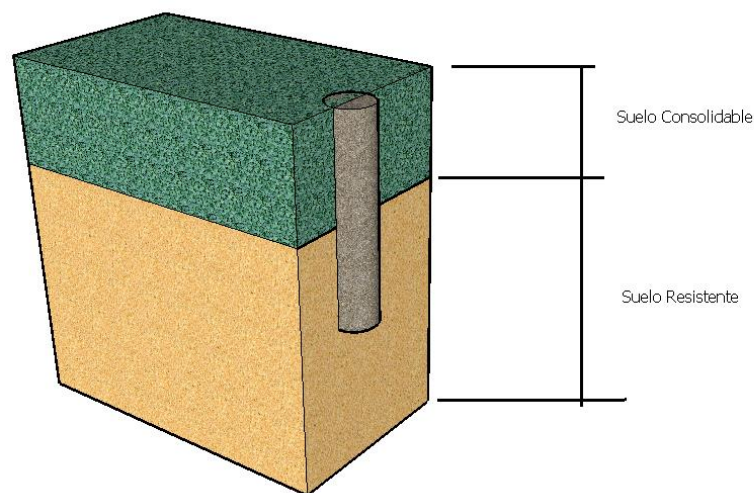


Figura 2.23 Modelo en 3D

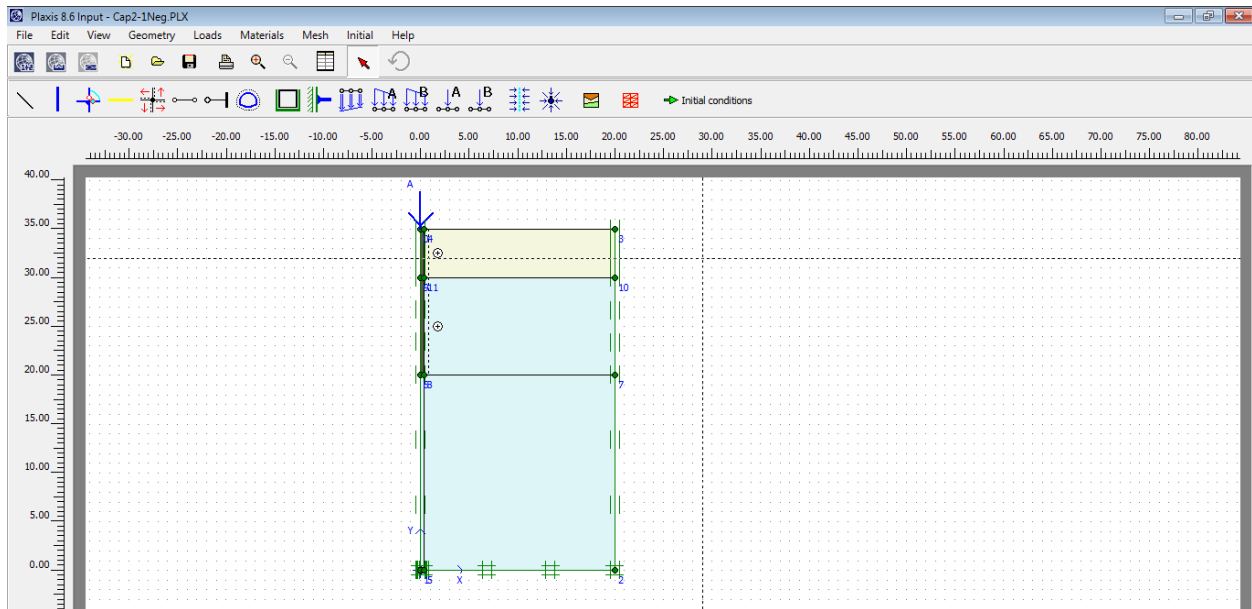


Figura 2.24 Modelación en el Plaxis del pilote atravesando dos suelos

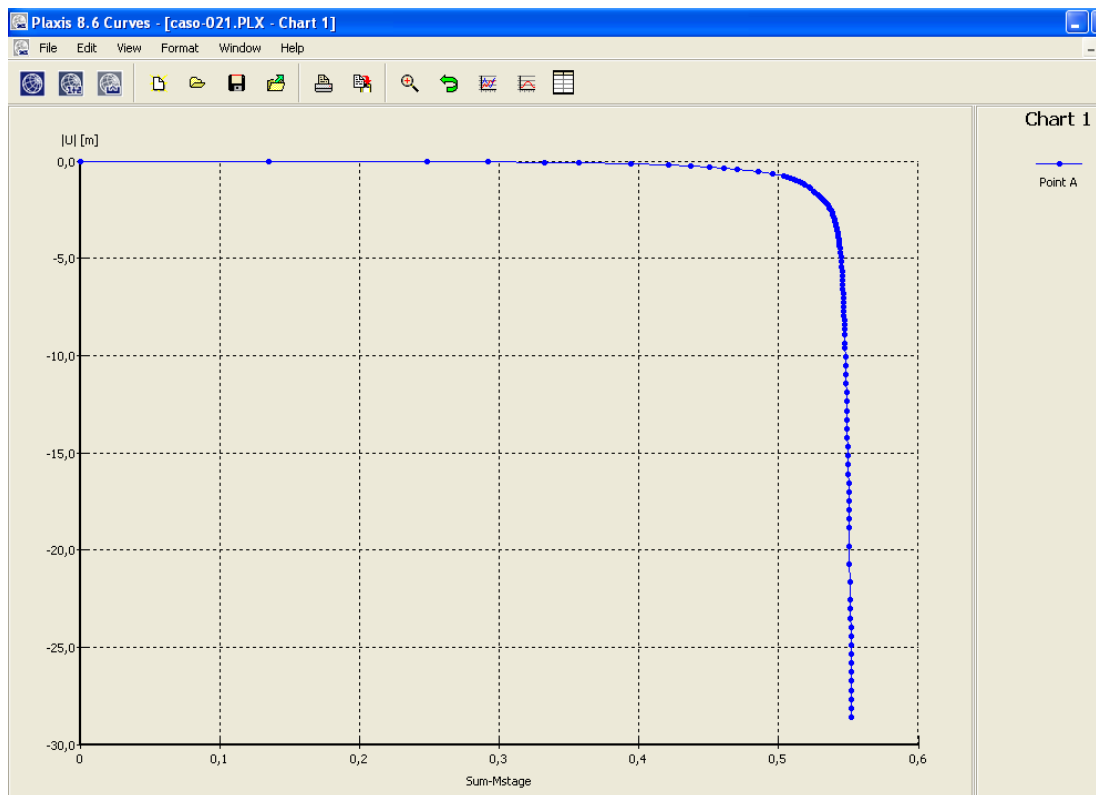


Figura 2.25 Resultado de la curva carga deformación cuando hay presencia de fricción negativa.

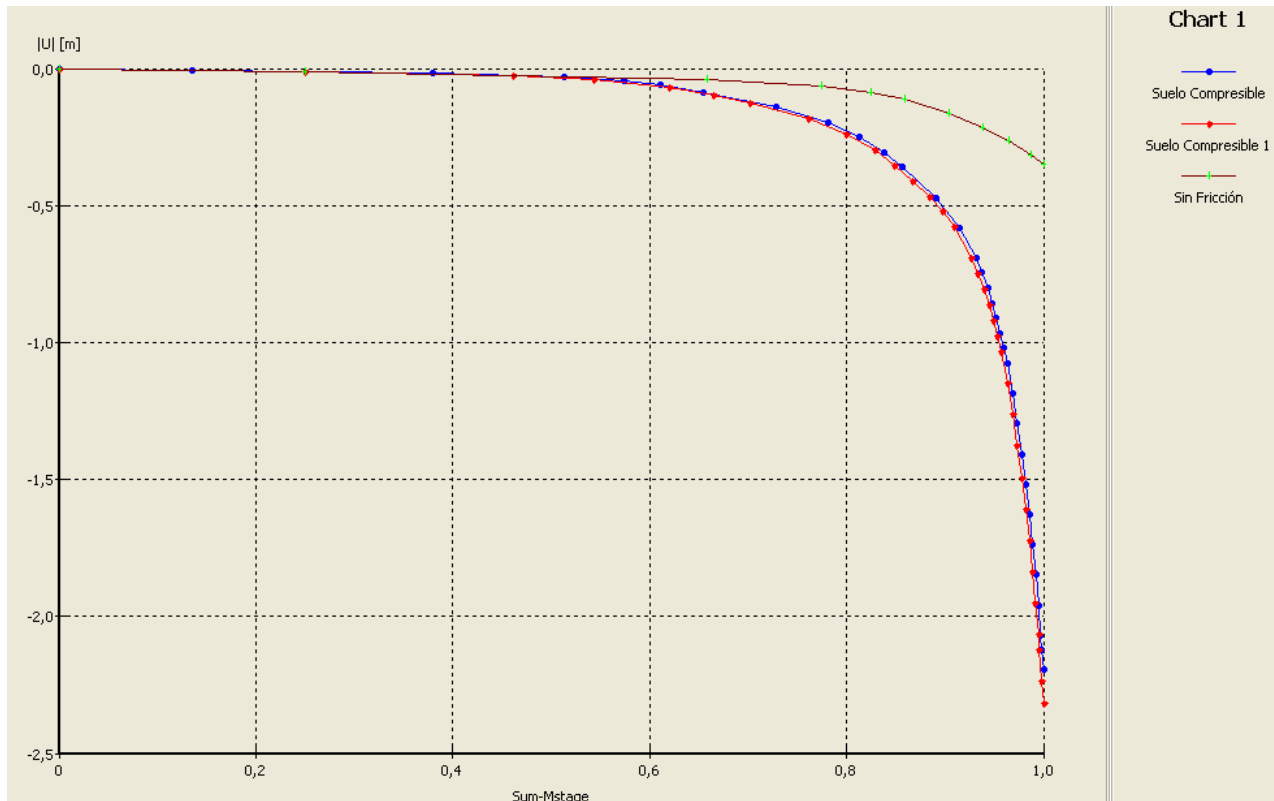


Figura 2.26 Comparación de carga deformación con diferentes suelos

Como se puede apreciar en la medida que disminuye el módulo de deformación del suelo en la cara del pilote (en que genera fricción negativa) menor es el valor de capacidad resistente del mismo (curvas de color azul y color rojo).

En el capítulo 3 se realizarán diferentes modelaciones donde se evalúen el efecto de las características de los suelos alrededor de la cara del pilote.

Capítulo 2: Estudio del trabajo de grupos de pilotes y fricción negativa en cimentaciones sobre pilotes

En el programa Geo5 se tiene en cuenta el efecto de la fricción negativa pero este programa requiere especificar el espesor de suelo que se comprime y cuanto es la deformación del mismo, a partir de estos datos se calcula la capacidad de carga del pilote. De manera puntual se puede destacar que en este programa se asume que la punta del pilote trabaja como un muelle como el modelo de Winkler, no modelando pilotes apoyados en suelo no se tiene en cuenta el efecto de la fricción negativa.

En el caso de que los proyectistas deseen evaluar el efecto de la fricción negativa y conozcan todos los parámetros del suelo incluido el módulo de balastro del mismo pudiera ser utilizado dicho programa para tener en cuenta el efecto de la fricción negativa.

Para este programa, el análisis teórico es el siguiente: El rozamiento negativo es un fenómeno que surge de un asentamiento de suelo alrededor del pilote. El suelo deformado alrededor del pilote tiende a tirar el pilote hacia abajo reduciendo así su capacidad portante para un asiento de pilote determinado.

El parámetro introducido para evaluar la influencia del rozamiento negativo es el asentamiento de la superficie terrestre w y una profundidad de la zona de influencia de la deformación h . Para una carga uniformemente distribuida alrededor del pilote, el valor de w debería ser medido a una distancia igual a tres veces el diámetro del pilote desde su cara externa. Este valor representa la profundidad influenciada por el asentamiento de la superficie terrestre y debajo de la cual el suelo se supone incompresible sin deformación.

El cálculo del rozamiento negativo se lleva a cabo primero mientras se determinan las fuerzas de corte límites, transmitidas por la cara del pilote T_{lim} . El proceso de solución asume que el asentamiento del suelo decrece linealmente con la profundidad del valor de w en la superficie del terreno hasta 0 a una profundidad h . Las fuerzas desarrolladas en resortes (resortes que soportan distintos elementos) debido a su deformación son determinados y luego substraídos de T_{lim} para reducir la capacidad portante de la piel del pilote.

Desde la representación teórica es evidente que para un asentamiento grande w o una profundidad grande h el valor de T_{lim} puede pasar por debajo de cero. En casos extremos el valor del rozamiento negativo puede eliminar completamente la capacidad portante de la piel del pilote, entonces el pilote es soportado solo por el subsuelo elástico debajo de la base del pilote.

Capítulo 2: Estudio del trabajo de grupos de pilotes y fricción negativa en cimentaciones sobre pilotes

Se modela un ejemplo de un pilote de 8m de longitud, diámetro de 0.75 m. En la figura 2.27 aparecen los resultados del pilote en suelo homogéneo y en la figura 2.29 con la presencia de fricción negativa (se consolida un suelo de espesor 3 metros)

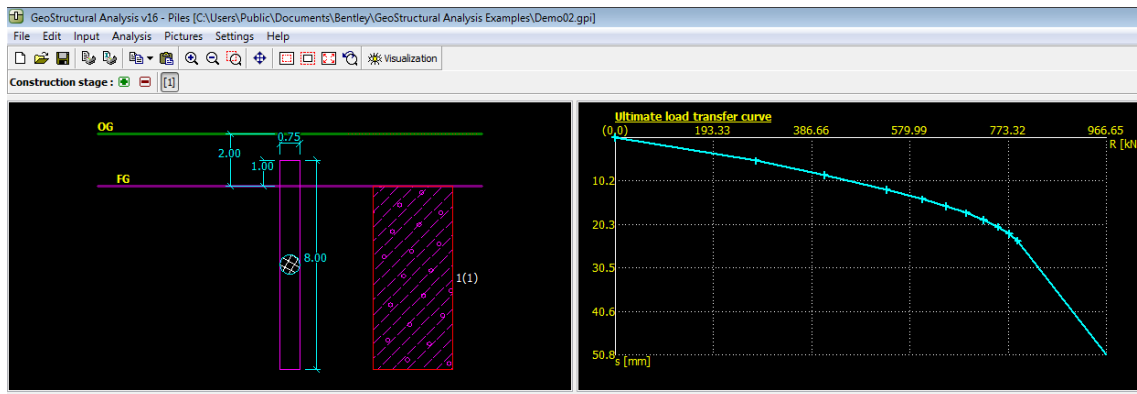


Figura 2.27 Suelo Homogéneo

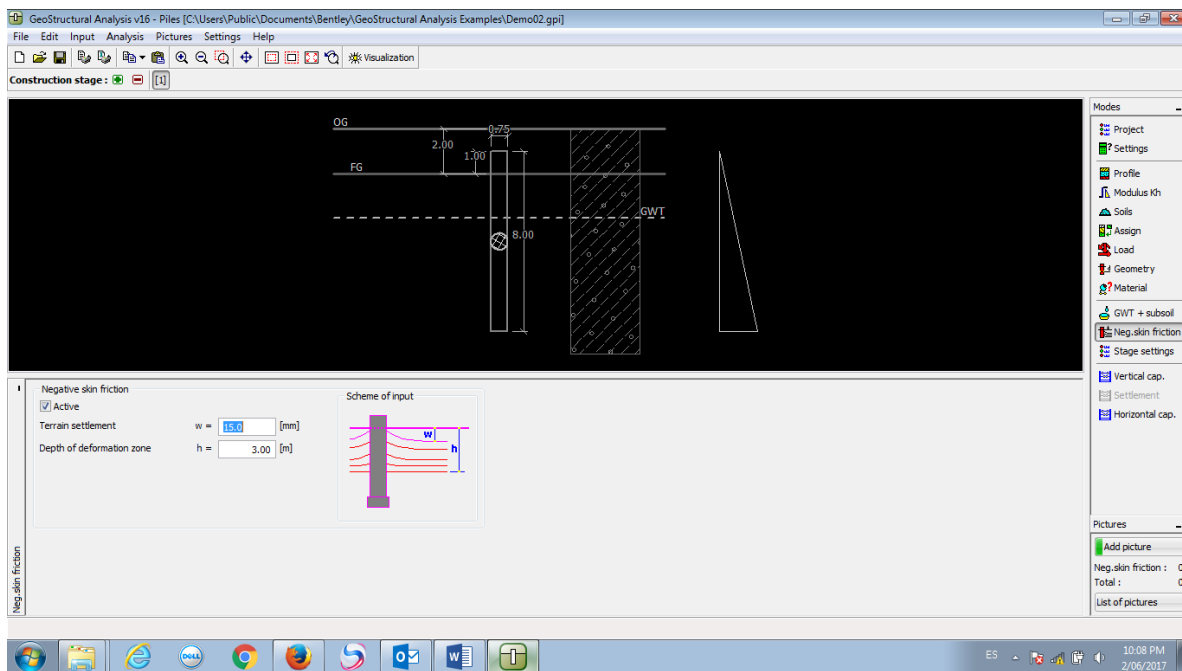


Figura 2.28 Datos para modelar el efecto de la fricción negativa

Capítulo 2: Estudio del trabajo de grupos de pilotes y fricción negativa en cimentaciones sobre pilotes

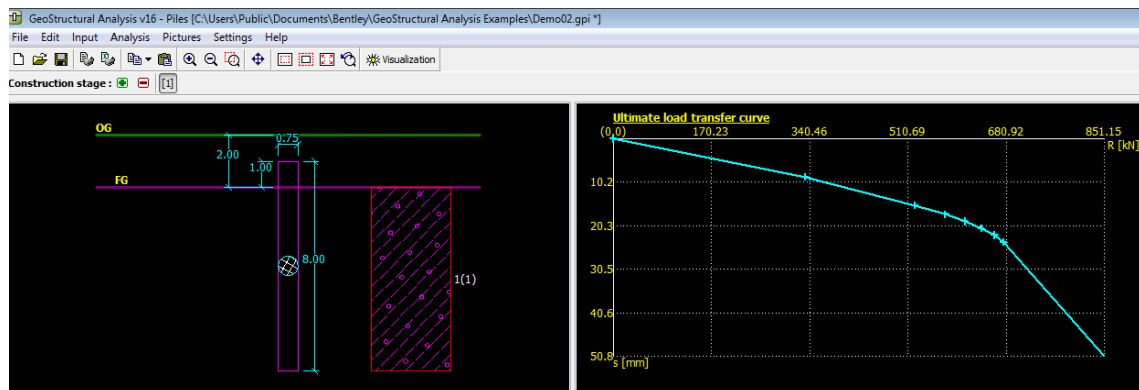


Figura 2.29 Considerando 3 metros de suelo que se consolidan 15mm

Los resultados obtenidos plantean que en el caso de que no se tenga en cuenta la fricción negativa la capacidad de carga de la cimentación es de 966 kN y en el caso de que se considere este efecto es de 851 kN. Como puede apreciarse, este software permite una aproximación más precisa para analizar el efecto de la fricción negativa, siempre que se conozca el espesor de suelo alrededor del pilote que se consolide.

2.6 Conclusiones Parciales

Una vez modelado el efecto de un pilote aislado con o sin fricción negativa y los pilotes en grupo se arriban a las siguientes conclusiones:

- A través de la modelación matemática se puede modelar el comportamiento de pilotes trabajando en grupo y la fricción negativa.
- Existen programas que evalúan el efecto del espesor de estrato consolidable alrededor de la cara del pilote (Geofine)
- El modelo propuesto es capaz de reproducir el efecto de la fricción negativa en cimentaciones sobre pilotes

Capítulo 3

Capítulo 3. Análisis del efecto de la fricción negativa y el fallo en grupo en cimentaciones sobre pilotes

3.1 Introducción

En este capítulo, a partir del modelo obtenido en el capítulo 2 se realizará la modelación de un pilote aislado que atraviesa estratos de suelos muy consolidables con el objetivo de evaluar el efecto de la fricción negativa.

A continuación, se determina la eficiencia de grupo para cimentaciones sobre pilotes conformadas por varios números de pilotes espaciados a diferentes valores, de manera tal de observar cómo influye el espaciamiento en la capacidad individual del pilote. Finalmente se modela una cimentación de 4 pilotes, para estimar bajo qué condiciones se genera el fallo en grupo.

3.2 Análisis de la fricción negativa

En este epígrafe se analiza el efecto de la presencia de un estrato de suelo consolidable en la parte superior del pilote, para ello se analiza un pilote aislados de 15m de longitud y 80cm de diámetro en un suelo cohesivo con $C=80$ kPa y $E_o=20000$ kPa, evaluando los valores de capacidad de carga obtenidos.

A continuación, se presentan los resultados para el pilote en suelo homogéneo, sin ser afectado por la fricción negativa.

Tabla 3.1 Capacidad de carga según diferentes normativas en kN

Plaxis 2D	Plaxis 3D	Norma Cubana	Caquot Kerrisel	Meyerhof
2050	2067	2043	3400	2076

A continuación, se modela una cimentación compuesta por un pilote de diámetro 80cm y longitud de 15m, que atraviesa un suelo compresible con una cohesión de 5 kPa y módulo de deformación de 2500 kPa, y el suelo de la base tiene una cohesión de 80 kPa y un módulo de deformación de 20000 kPa y la carga de rotura que se obtiene es de 1990 kN.

Capítulo 3. Análisis del efecto de la fricción negativa y el fallo en grupo en cimentaciones sobre pilotes

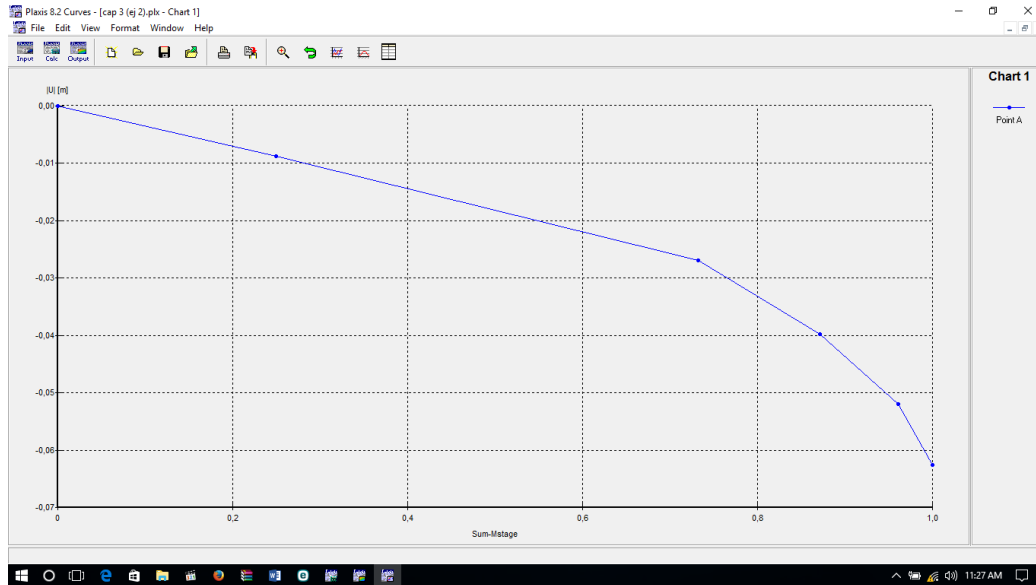


Figura 3.1 Curva Carga deformación. Carga de rotura $Q_t=1990$ kN

Se realizó una variación del módulo de deformación dando como resultado los mostrados en las siguientes figuras. (figura 3.2 y figura 3.3)

En la figura 3.2 se muestra la modelación del mismo pilote atravesando un suelo consolidable con 5 kPa de cohesión, pero un módulo de deformación de 4000 kPa obteniéndose una carga de rotura de 1995 kN.

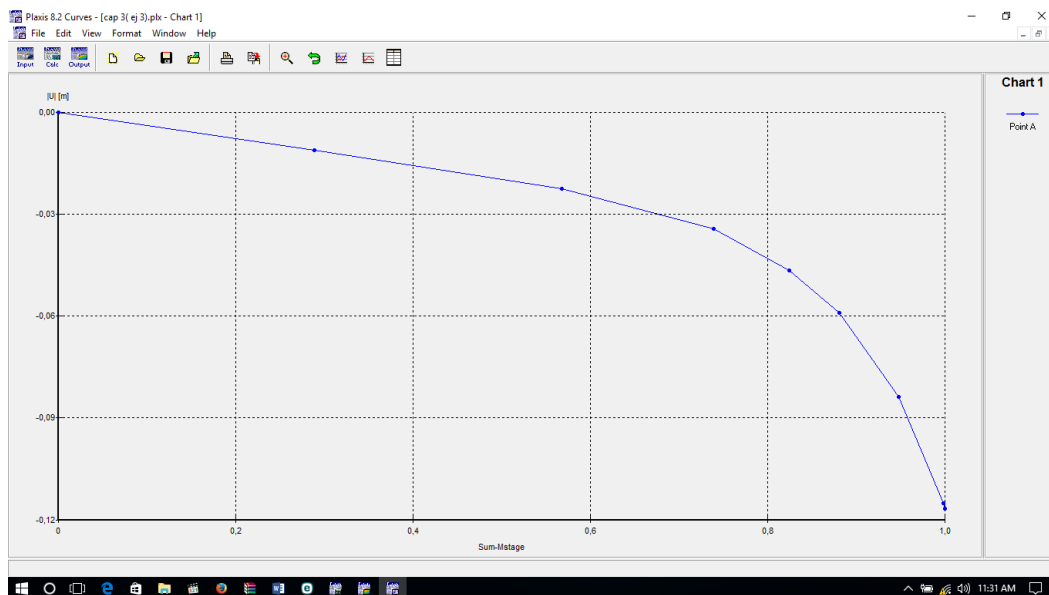


Figura 3.2 Para $C=5$ KPa $E_o= 4000$ KPa y una carga de $Q_t=1995$ kN

Capítulo 3. Análisis del efecto de la fricción negativa y el fallo en grupo en cimentaciones sobre pilotes

En este caso se modela el mismo pilote en un suelo con igual cohesión, pero con un módulo de deformación de 5500 kPa, obteniéndose una carga de rotura de $Q_t = 2020$ kN.

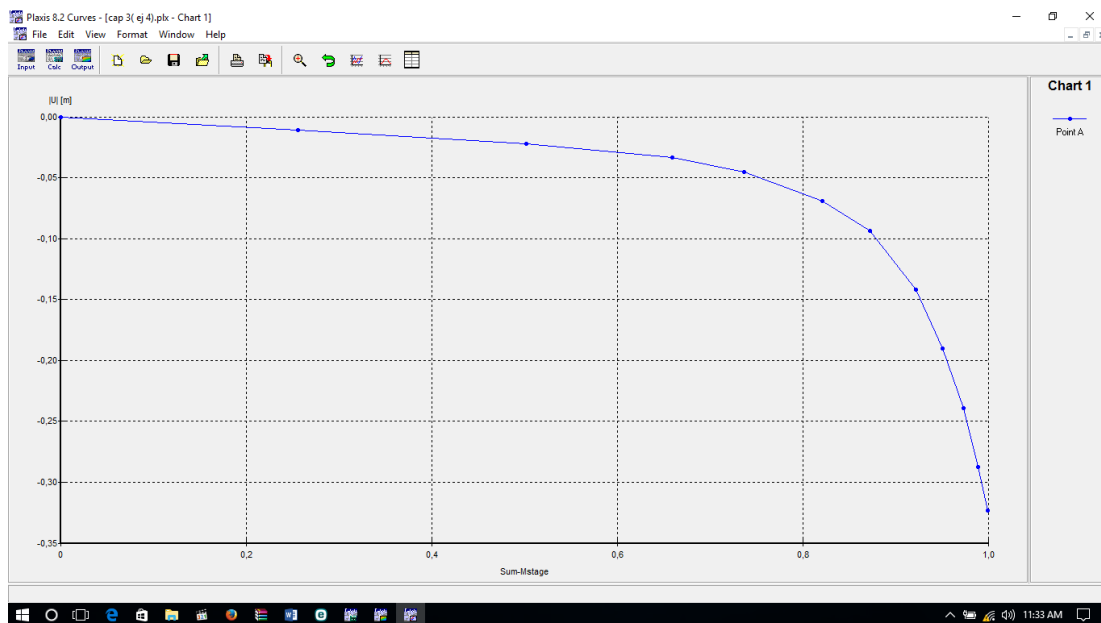


Figura 3.3 Para $C=5$ kPa $E_o= 5500$ kPa $Q_t=2020$ kN

Luego se modelo para un estrato de 5m, pero de cohesión 10 kPa y se obtienen los siguientes resultados variando los módulos de deformación.

A continuación, se muestra la modelación de un pilote con las mismas características, pero esta vez atravesando un suelo con cohesión de 10 kPa y módulo de deformación de 2500 kPa, obteniéndose una carga de rotura de $Q_t = 1940$ kN.

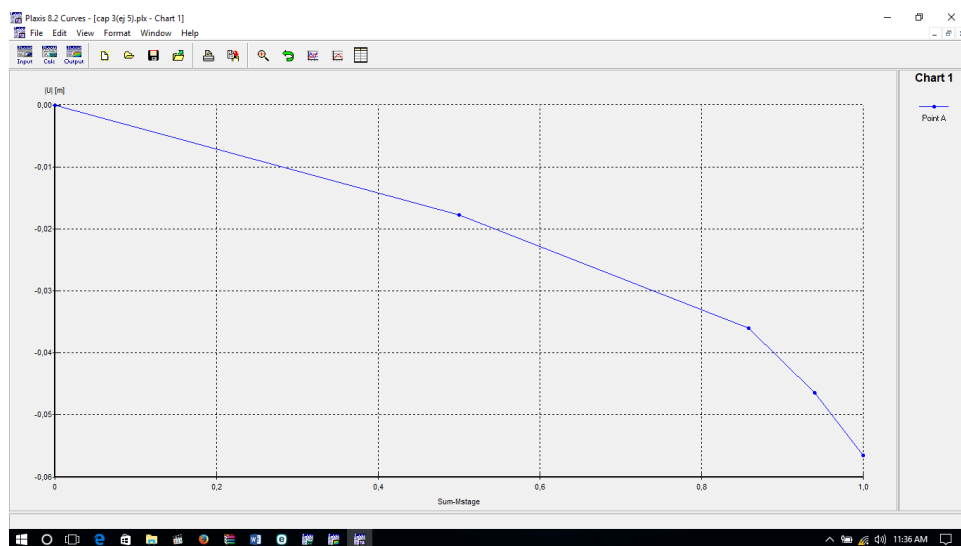


Figura 3.4 Para $C=10$ kPa $E_o= 2500$ kPa $Q_t=1940$ kN

Capítulo 3. Análisis del efecto de la fricción negativa y el fallo en grupo en cimentaciones sobre pilotes

En la figura 3.5 se muestra la modelación del mismo pilote atravesando un suelo consolidable con 10 kPa de cohesión, pero un módulo de deformación de 4000 kPa obteniéndose una carga de rotura de $Q_t=1982$ kN.

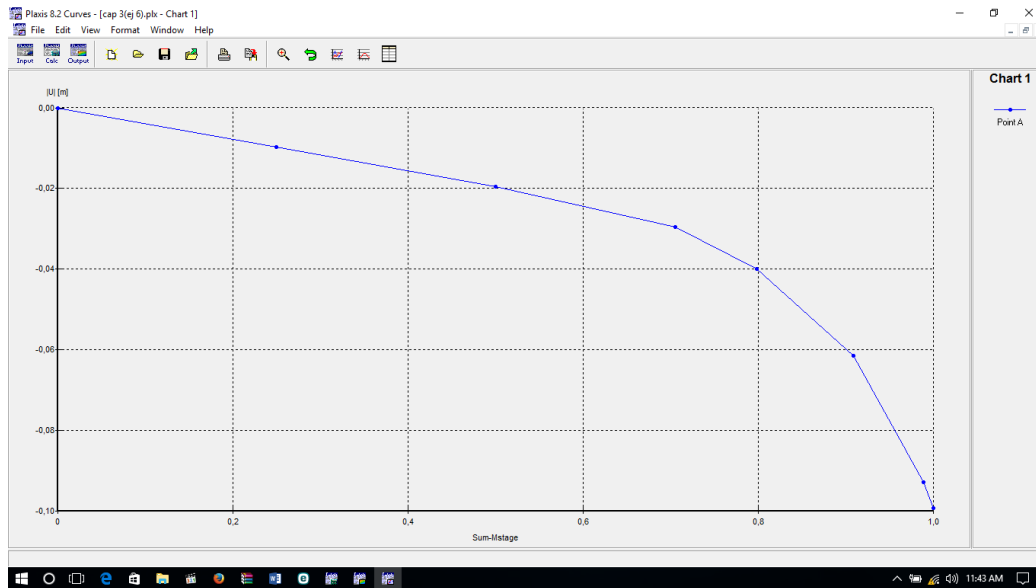


Figura 3.5 Para $C=10$ kPa $E_o=4000$ kPa $Q_t=1982$ kN

En este caso se modela el mismo pilote en un suelo con igual cohesión, pero con un módulo de deformación de 5500 kPa, obteniéndose una carga de rotura de $Q_t=1999$ kN.

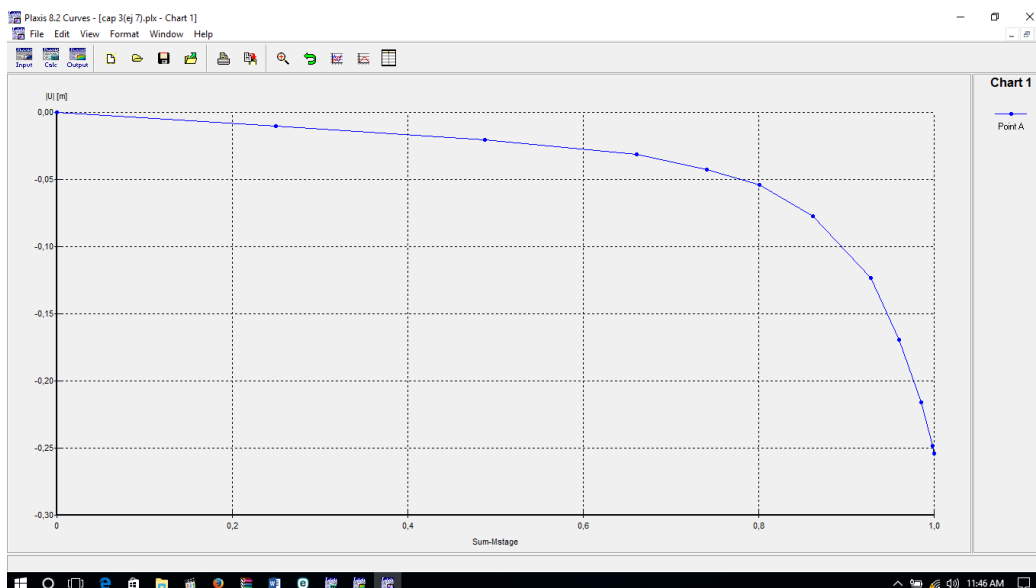


Figura 3.6 Para $C=10$ kPa $E_o=5500$ kPa $Q_t=1999$ kN

Capítulo 3. Análisis del efecto de la fricción negativa y el fallo en grupo en cimentaciones sobre pilotes

A continuación, se muestra el mismo pilote, pero esta vez atravesando un suelo de cohesión de 20 kPa y módulo de deformación de 2500 kPa, obteniéndose una carga de rotura de $Q_t=1980$ kN.

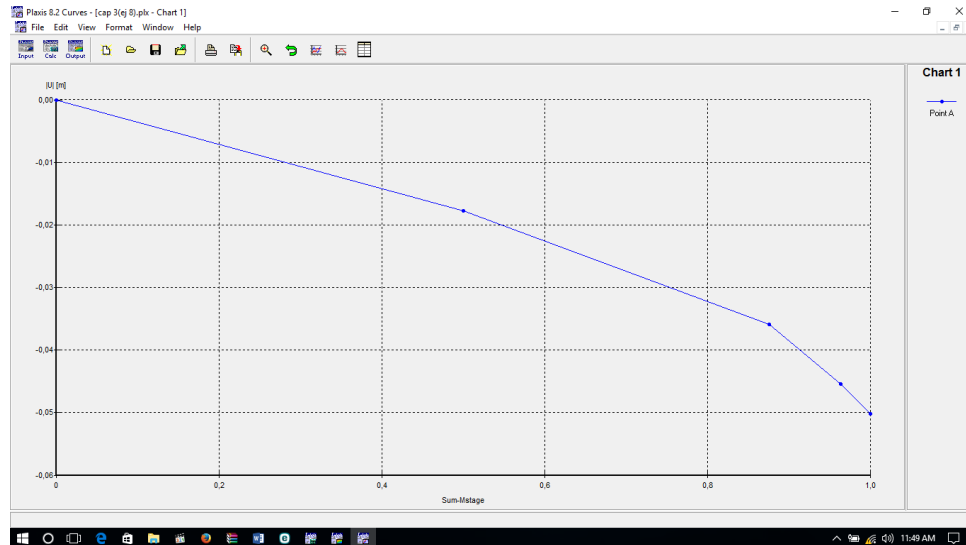


Figura 3.7 Para $C=20$ kPa $E_o=2500$ kPa $Q_t=1980$ kN

En la figura 3.8 se muestra la modelación del mismo pilote atravesando un suelo consolidable con 20 kPa de cohesión, pero un módulo de deformación de 4000 kPa obteniéndose una carga de rotura de $Q_t=1990$ kN.

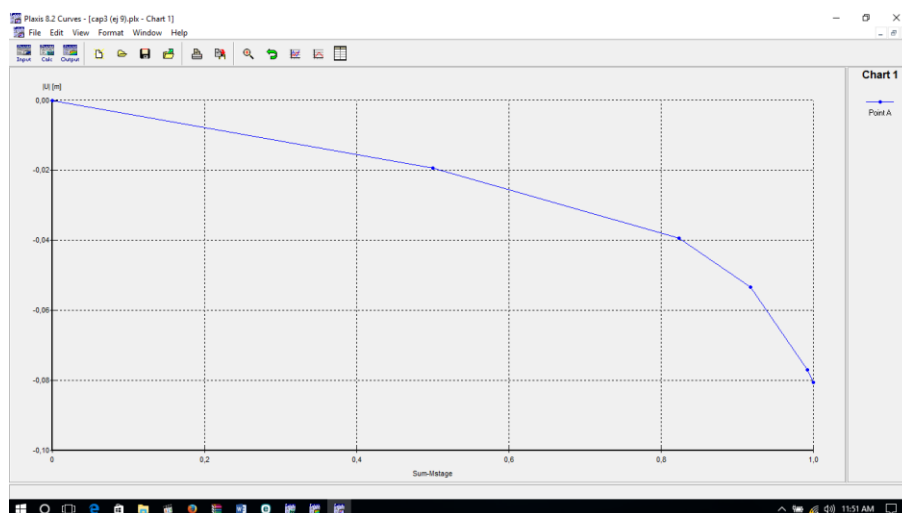


Figura 3.8 Para $C=20$ kPa $E_o=4000$ kPa $Q_t=1990$ kN

Capítulo 3. Análisis del efecto de la fricción negativa y el fallo en grupo en cimentaciones sobre pilotes

En este caso se modela el mismo pilote en un suelo con igual cohesión, pero con un módulo de deformación de 5500 kPa, obteniéndose una carga de rotura de $Q_t=2010$ kN.

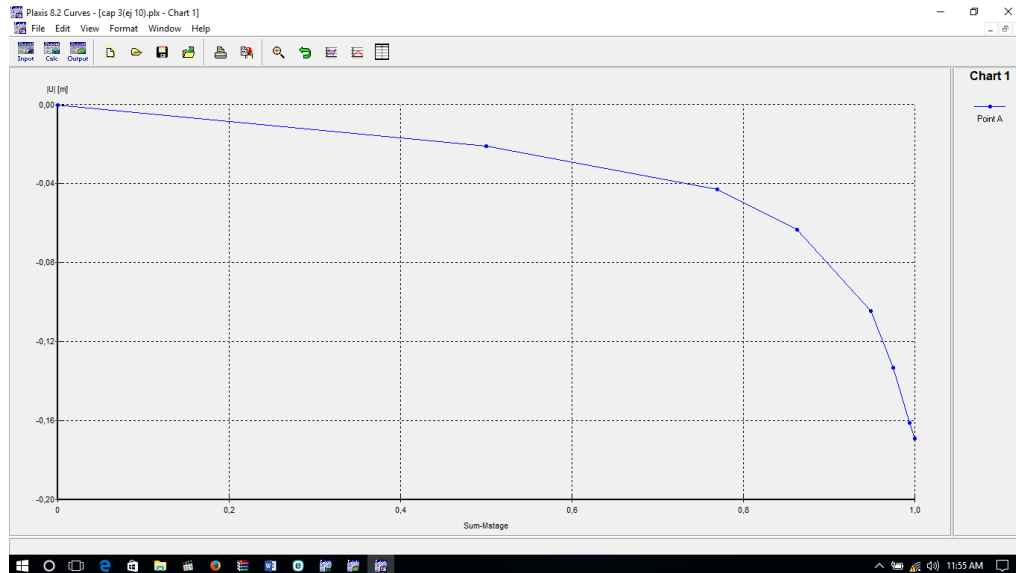


Figura 3.9 Para $C=20$ kPa $E_o=5500$ kPa $Q_t=2010$ kN

Como se puede apreciar en los resultados obtenidos de la modelación, en la medida en que el suelo de las caras del pilote es más comprensible el efecto de la fricción negativa se hace menor, por lo cual disminuye la capacidad resistente del pilote, en todos los casos se debe señalar que se consideró que el suelo en la punta del pilote era el mismo, por lo que cuando el suelo con mayor módulo general de deformación, se deforme menos, estos resultados pudieran variar.

Tabla 3.2 Tabla resumen de los valores analizados anteriormente.

C(kPa)	E_o (kPa)	Q_T (kN)
5	2500	1990
	4000	1995
	5500	2020
10	2500	1940
	4000	1982
	5500	1999
20	2500	1980
	4000	1990

	5500	2010
--	------	------

Si de manera puntual se calculará la fricción negativa que genera el suelo compresible, considerando todo el espesor de suelo generando fricción negativa, se puede comprobar que los valores obtenidos son mucho menores que los de capacidad obtenidos por la modelación. En este caso se realizan de igual manera los cálculos para un pilote de 15 metros y considerando un módulo de deformación $E_o = 5500 \text{ kPa}$

Tabla 3.3 Diferencias entre los métodos tradicionales de la modelación para el cálculo de la fricción negativa.

C(kPa)	Q _T (kN)	% Diferencia modelo
5	2050 – 75 = 1975	2.11
10	2050 – 146 = 1904	4.75
20	2050 – 271 = 1779	11.45

A continuación, se analizan los resultados obtenidos con respecto a estudio de campo consultados en la bibliografía internacional:

3.3 Estudios de campo

3.3.1 Holanda (Plomp y Mierlo, 1948)

La primera investigación en campo que puso en evidencia el desarrollo de fricción negativa fue publicada por Plomp y Mierlo en el año de 1948. En dicha investigación se presentan una serie de pruebas que se realizaron en Holanda, con el propósito de determinar el efecto del bombeo de agua de los acuíferos en las cimentaciones a base de pilotes de punta. La estratigrafía de la zona y las características generales de la prueba se muestran en la Figura 3.10

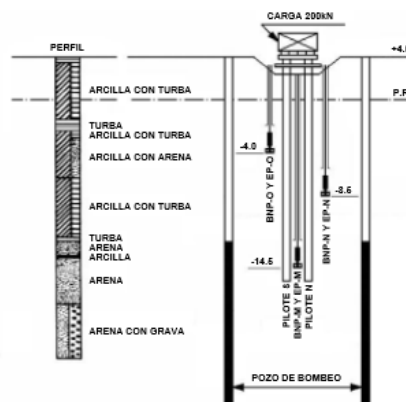


Figura 3.10 Estratigrafía y características generales de la prueba (Plomp y Mierlo, 1948)

Capítulo 3. Análisis del efecto de la fricción negativa y el fallo en grupo en cimentaciones sobre pilotes

La prueba consistió en colocar dos pilotes de prueba hasta 15m de profundidad, aproximadamente, sometiéndolos a una carga de 100 kN a cada uno, y a un abatimiento piezométrico de 70 kPa a una profundidad de 15m, Figura 3.11. Dicho abatimiento se logró con la instalación de dos pozos de bombeo hasta la profundidad del estrato de arena y disminuyendo el tirante de agua en unos 7m.

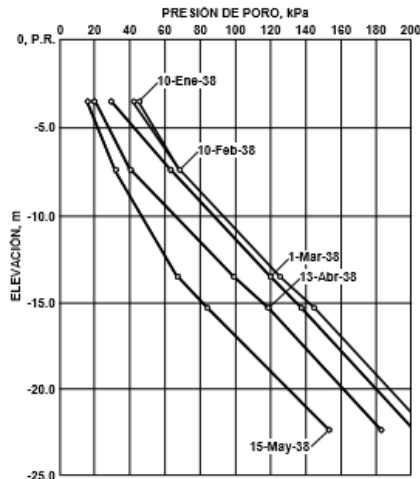


Figura 3.11 Variación de la piezometría con el tiempo (Plomp y Mierlo, 1948)

El estudio demuestra la existencia de un nivel neutro (aunque todavía no lo llamaban como tal), comparando los asentamientos medidos en varias profundidades del medio, con los sufridos por los pilotes, en diversos intervalos de tiempo, Figura 3.12, y se define como la profundidad en la que la fricción negativa pasa a positiva y donde el asentamiento absoluto entre pilote y suelo es el mismo. Se demuestra también que la profundidad de dicho nivel se incrementa con el tiempo conforme lo hace el abatimiento de las presiones intersticiales.

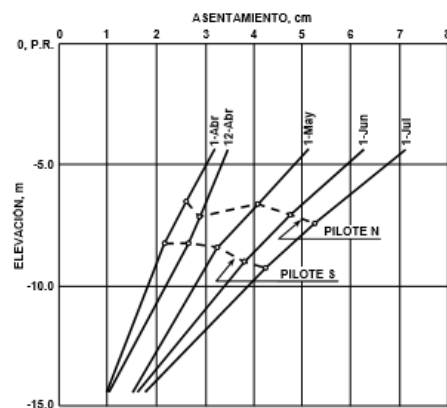


Figura 3.12 Determinación de la profundidad del nivel neutro (Plomp y Mierlo, 1948)

3.3.2 Canadá (Bozozuk, 1981)

El autor presenta los resultados de una prueba de carga realizada en Canadá, a un pilote de acero de 49m de longitud y 32.4cm de diámetro, que fue sometido a diez años de fricción negativa debida a la consolidación de una arcilla marina de aproximadamente 73 m de espesor, generada por la sobrecarga de un terraplén de arena fina de 10m de altura, Figura 3.14

Como se observa en la Figura 3.15, la carga axial máxima desarrollada en el nivel neutro (Q_{neg}) fue del orden de los 1.52MN, después de diez años de haber hincado el pilote. Para la carga máxima registrada, el esfuerzo unitario desarrollado en el acero fue de hasta 190 MPa, cercano a su esfuerzo de fluencia. La prueba se realizó en tres etapas: en la Etapa A se aplicó una carga externa igual a (Q_{neg}) en tres incrementos y en un período de 11 días, luego se retiró y se dejó reposar durante tres días; para la Etapa B la carga se incrementó hasta $2Q_{neg}$, también en tres incrementos y en un periodo de siete días, retirando la carga y dejando reposar durante otros tres días; en la Etapa C se aplicaron varios ciclos de carga y descarga.

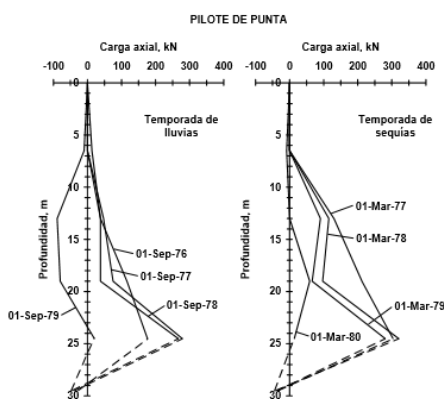


Figura 3.13 Carga axial registrada en el pilote de punta (obtenido de Auvinet y Hanel, 1981)

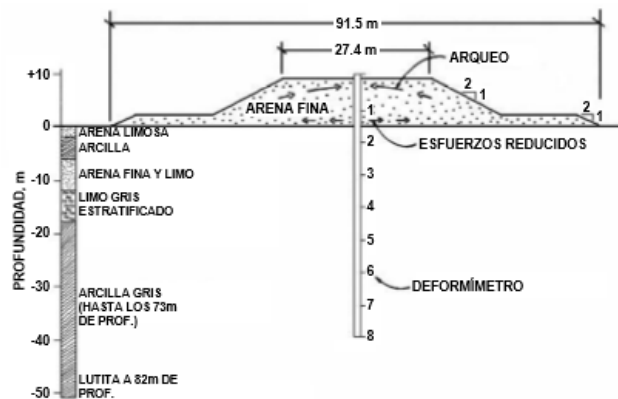


Figura 3.14 Características generales de la prueba (Bozozuk, 1981)

Los resultados obtenidos son similares a los reportados por Fellenius y Broms (1969) y Bjerin (1977), ya que se concluye que la carga axial máxima generada a la profundidad del nivel neutro (Q_{neg} .) debida a los 10 años de fricción negativa, puede considerarse como una precarga que es capaz de responder a cargas transitorias, cíclicas y vivas de poca duración. Para cargas mayores a Q_{neg} se desarrolló fricción positiva en la parte superior del elemento, los

Capítulo 3. Análisis del efecto de la fricción negativa y el fallo en grupo en cimentaciones sobre pilotes

desplazamientos del pilote se incrementaron considerablemente e inclusive se llegó a la falla para $2Q_{neg}$.

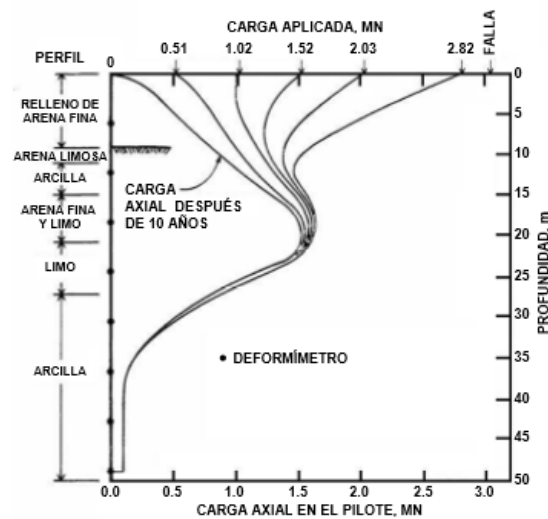


Figura 3.15 Distribución de carga en el pilote de prueba (Bozozuk, 1981)

3.3.3 Modelo teórico propuesto

Considerando los resultados anteriores, se evidencia que en todos los casos se puede considerar a la fricción negativa, como una carga adicional a resistir por la cimentación al “colgarse” el suelo consolidable en las caras del pilote. El objetivo del modelo estará dirigido entonces a determinar a qué profundidad los desplazamientos del pilote y del suelo son iguales, o lo que es lo mismo, a qué profundidad es que se comienza a generar la fricción negativa.

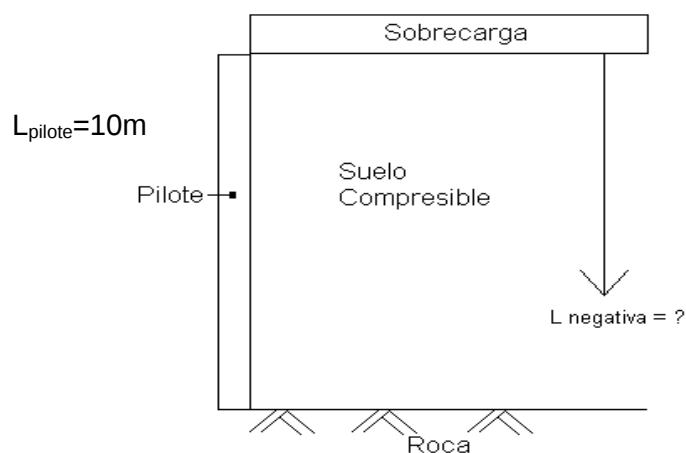


Figura 3.16 Esquema del modelo utilizado.

Capítulo 3. Análisis del efecto de la fricción negativa y el fallo en grupo en cimentaciones sobre pilotes

Para pequeños valores de deformación del pilote, todo el espesor de suelo genera fricción negativa. En la medida en que aumenta la deformación del pilote por la acción de la carga externa, los desplazamientos de este serán mayores que los del suelo, por lo que el espesor que genera fricción negativa disminuye. Estos resultados demuestran que el valor de fricción negativa que se genera en las caras del pilote depende en gran medida de la deformación del mismo, del relleno existente (sobre carga) y del suelo consolidable.

Estos resultados afianzan el criterio de que se ha de tener en cuenta la relación entre la deformación del suelo y el pilote para el cálculo de la fricción negativa, fundamentalmente en aquellos casos donde este valor arroje altos resultados que conlleven a diseños de pilotes muy esbeltos.

Por lo complicado que resulta establecer un criterio práctico para el cálculo de la longitud negativa se propone, para aquellos casos que por su importancia lo requiera, determinar de forma independiente la deformación del pilote y la del estrato de suelo y obtener posteriormente la profundidad a partir de la cual ambas deformaciones son iguales ($S_p = S_s$).

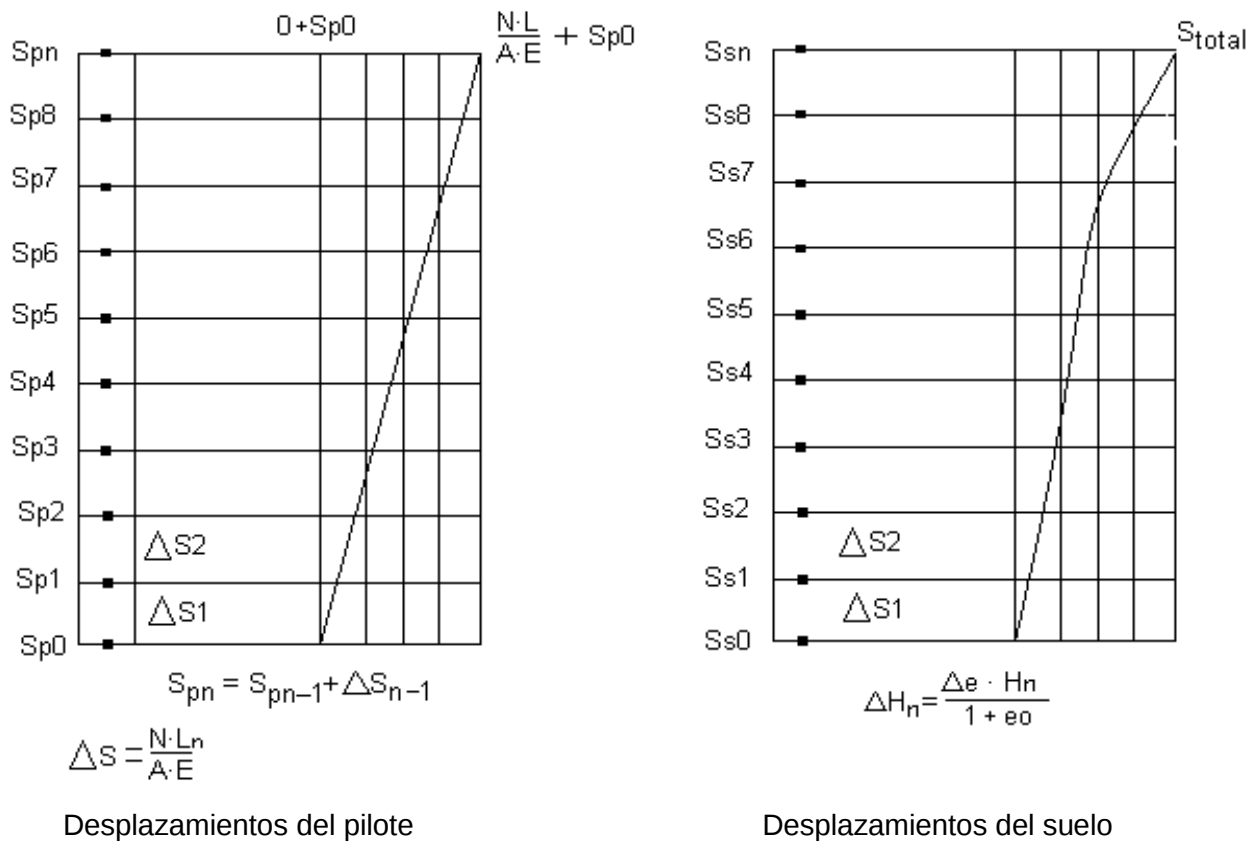


Figura 3.17 Esquema del proceso de cálculo.

En este caso es recomendable para el análisis dividir el pilote y el suelo en franjas de un metro y determinar los desplazamientos en cada punto (Ver figura 3.17). Para el caso del pilote el desplazamiento en un punto i viene dado por la expresión:

$$Sp_i = Sp_{i-1} + \Delta S_n$$

Sp_i – desplazamiento del pilote en el tramo i .

Sp_{i-1} - desplazamiento del pilote en el tramo anterior.

ΔS_n – desplazamiento en el tramo analizado $\Delta S_n = \frac{N \cdot L_i}{E \cdot A}$

Para caso el suelo se sigue un procedimiento similar:

$$Ss_i = Ss_{i-1} + \Delta H_i \quad \Delta H_i = \frac{\Delta e \cdot H_i}{1 + eo} \quad \text{Ec. (3.1)}$$

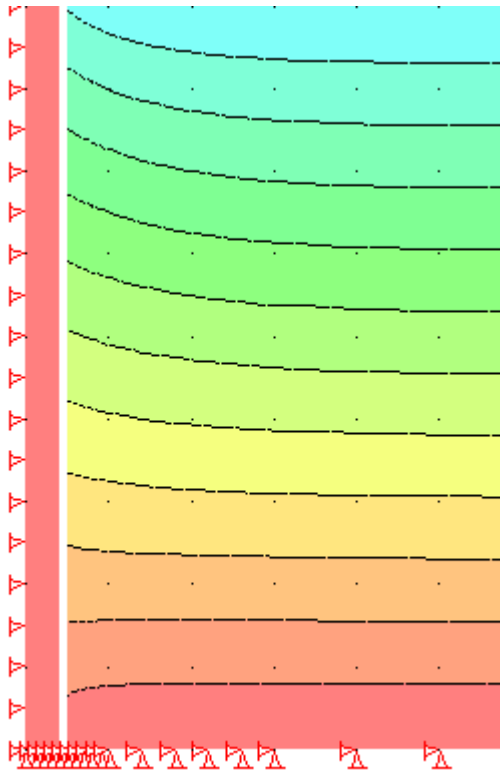


Figura 3.18 Estratos de suelo que se cuelgan del pilote (Presencia de la fricción negativa).

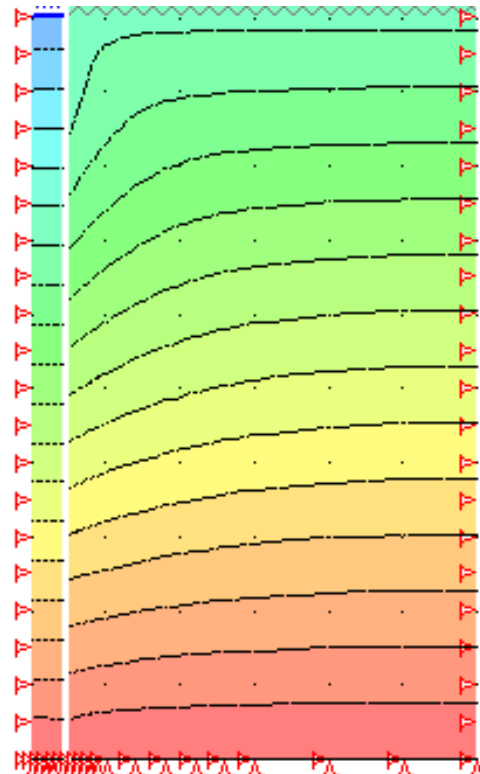


Figura 3.19 Pilote que se desplaza dentro de la masa de suelo (No existe fricción negativa).

Finalmente se procede a determinar la profundidad donde se igualan los desplazamientos del pilote y de los estratos de suelo que lo rodean ($S_{pi} \approx S_{si}$). En el caso de que los desplazamientos del pilote sean mayores que los del suelo ($S_p > S_s$) se puede considerar que no se genera la fricción negativa (Figura 3.18), en caso contrario ($S_{pi} < S_{si}$), se determina la profundidad a la que se igualan los desplazamientos (Figura 3.19) y si cumple en la punta del pilote que el desplazamiento es mayor que el del suelo, se puede tomar toda la longitud del pilote para el cálculo de la fricción negativa.

Teniendo en cuenta la complejidad de la modelación de la fricción negativa se recomiendan tres posibles soluciones:

- Aplicar las propuestas de determinar la deformación que genera el suelo y la deformación que se genera en un pilote. Con estos valores podemos determinar realmente que espesor de suelo se consolida y genera fricción negativa.

Capítulo 3. Análisis del efecto de la fricción negativa y el fallo en grupo en cimentaciones sobre pilotes

- Modelar con el programa Geofine un pilote teniendo en cuenta el efecto de fricción negativa y conociendo todos los parámetros de los suelos modelados
- De manera práctica se puede considerar que:
Para condiciones que los valores de fricción negativa sean pequeños, por la presencia de pequeños espesores o suelos con cohesión muy baja (Menor a 10 kPa) utilizar las expresiones clásicas de diseño
Para pilotes donde los efectos de la fricción negativa sean considerables, si el módulo de deformación del suelo consolidable es mayor a 5500 kPa y C es mayor a 10 kPa, se puede considerar un 10 % menos del efecto de la fricción negativa en el pilote

3.4 Análisis de un grupo de pilotes

A continuación, se realizan un grupo de análisis para evaluar el efecto del grupo de pilotes. Para ello se analiza con el programa Geofine el efecto de la eficiencia de trabajo de un pilote aislado dentro del grupo, se varia la cantidad de pilotes por fila y columna para determinar la eficiencia de grupo

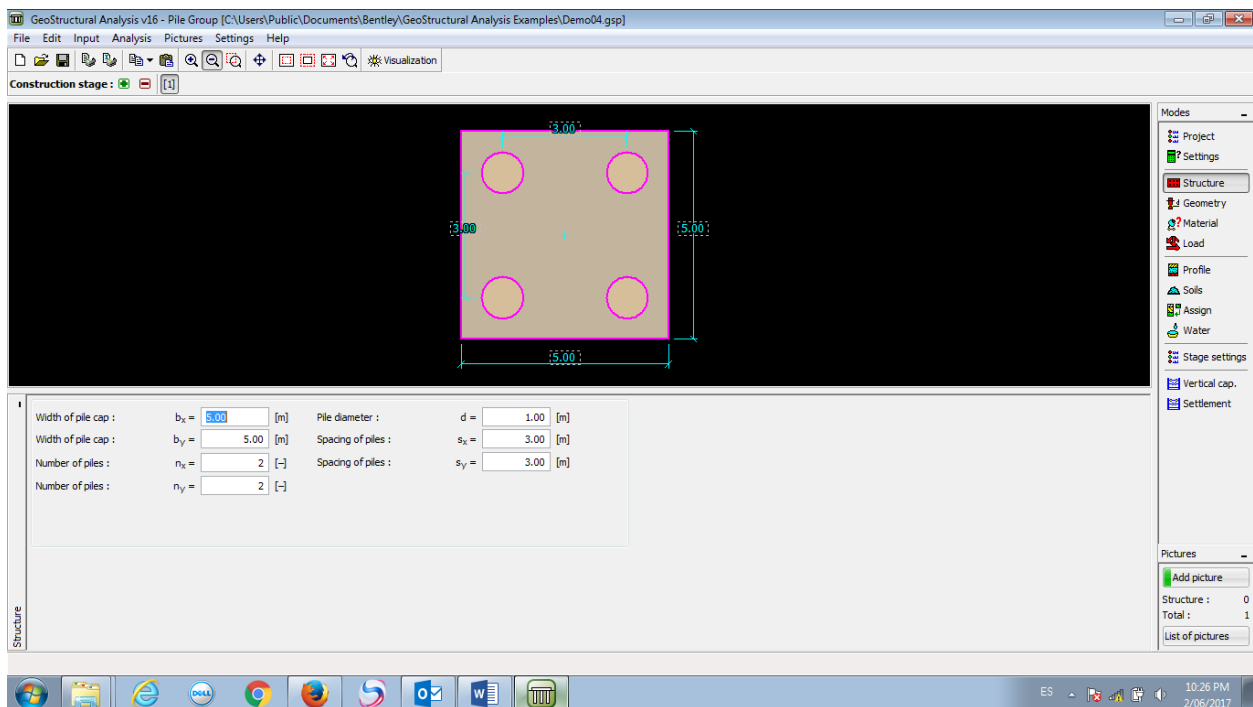


Figura 3.19 Modelo de cimentación formada por 4 pilotes

Capítulo 3. Análisis del efecto de la fricción negativa y el fallo en grupo en cimentaciones sobre pilotes

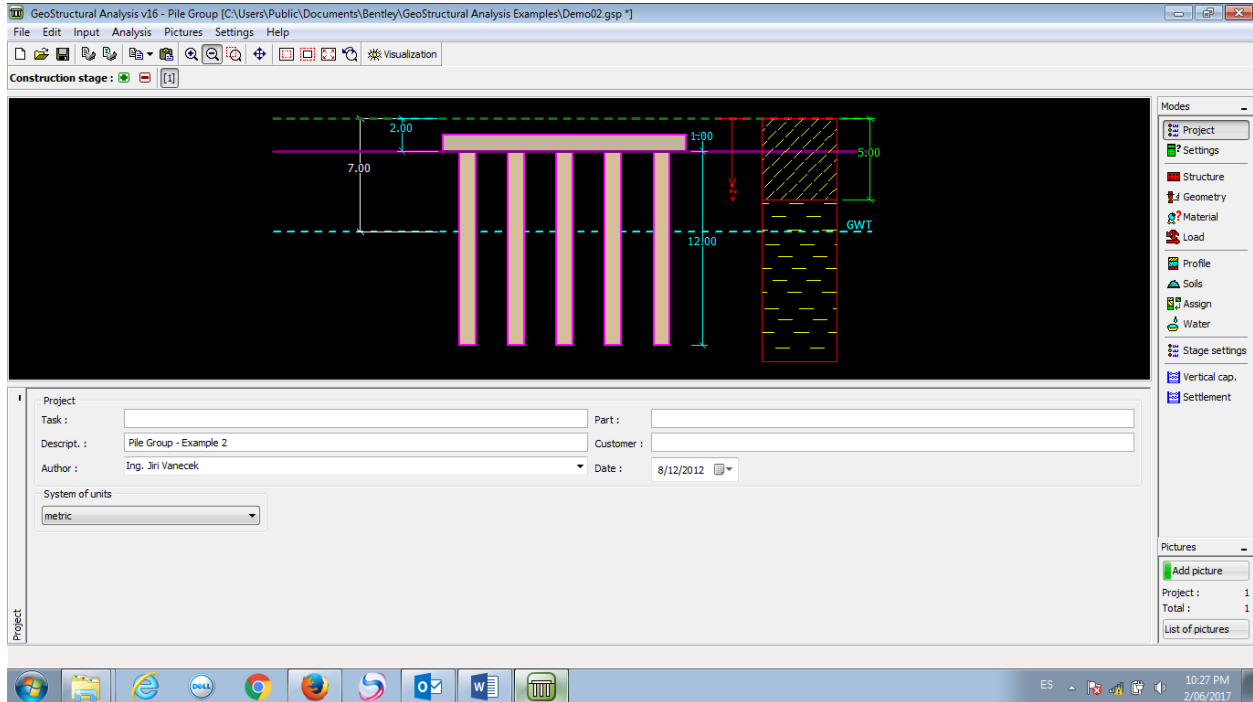


Figura 3.20 Modelo de cimentación formada por 16 pilotes

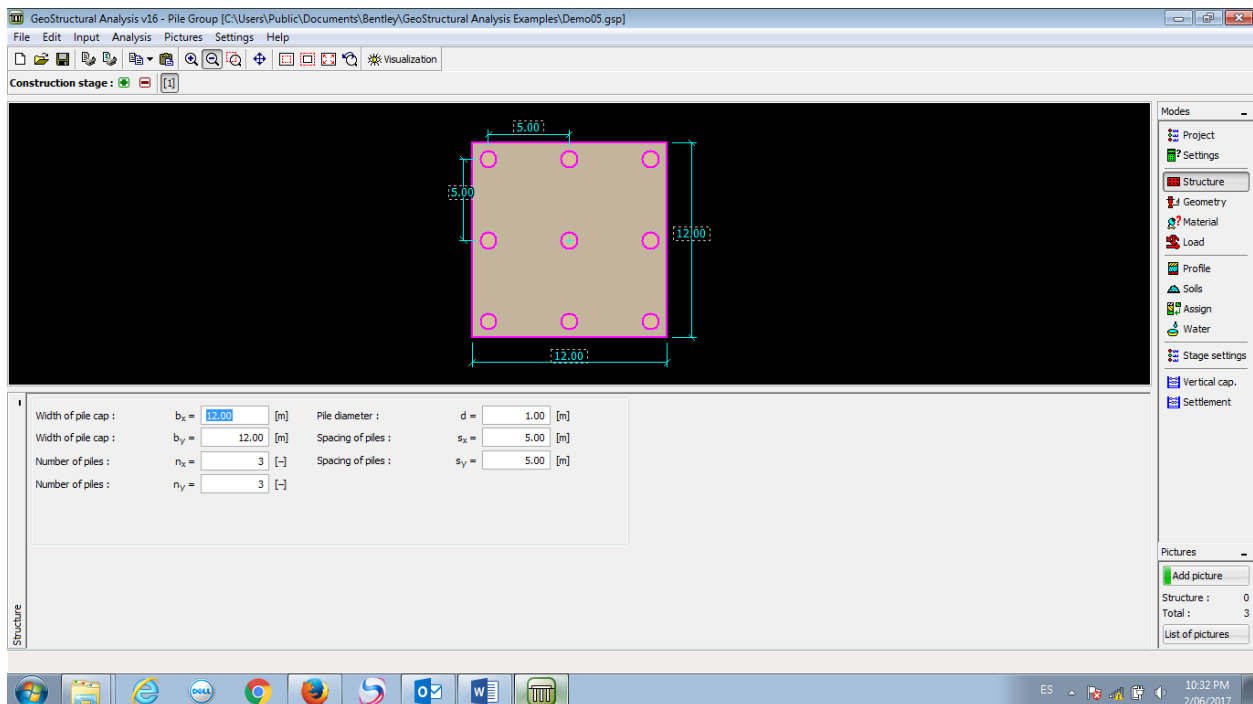


Figura 3.21 Modelo de cimentación formada por 9 pilotes.

A continuación, se presentan los resultados de la modelación de grupos de pilotes donde se varía el número de pilotes y el espaciamiento entre los mismos

Caso 1: 20 pilotes (5 fila x 4 columnas)

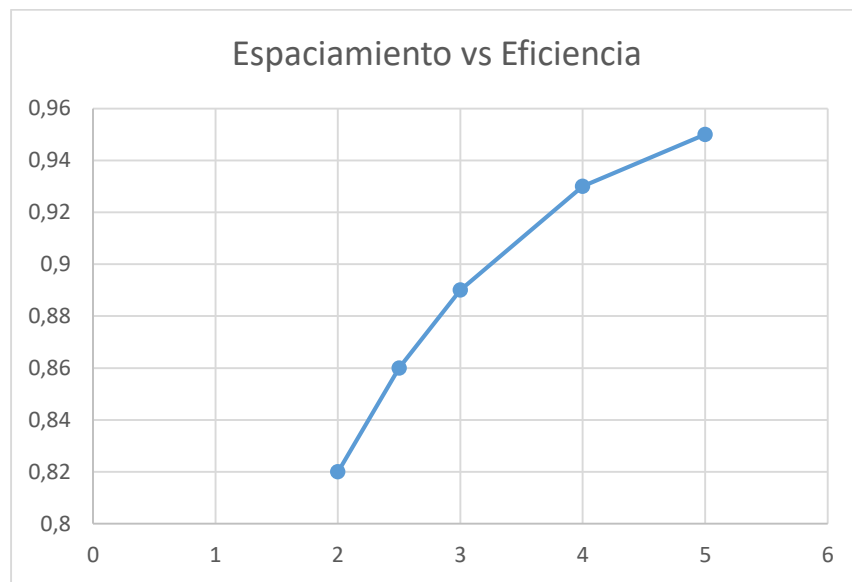


Figura 3.22 Curva Espaciamiento vs eficiencia para 20 pilotes

Caso 3: 16 pilotes (4 fila x 4 Columnas)

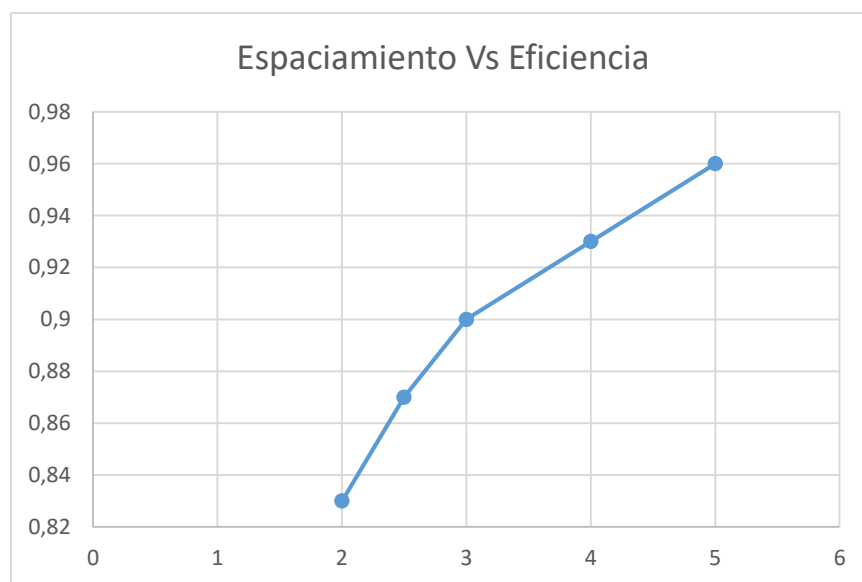


Figura 3.23 Curva espaciamento vs eficiencia para 16 pilotes

Caso 3: 9 pilotes (3 filas x 3 columnas)

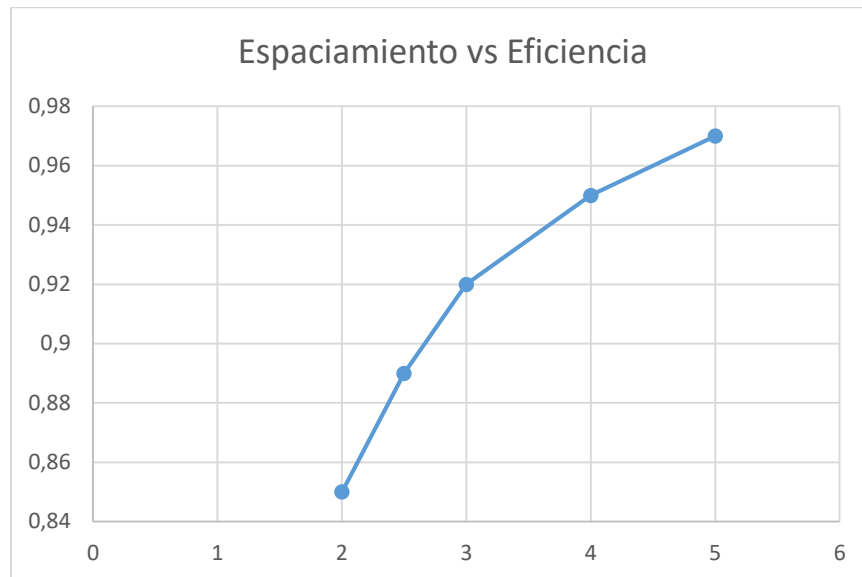


Figura 3.24 Curva espaciamento vs eficiencia para 9 pilotes

Analizando los resultados anteriores, aunque se trabaja con un mismo diámetro de pilote se puede considerar:

1. Los resultados de eficiencias contenidos del modelo son similares a los obtenidos por otras expresiones, como la propuesta en la Norma Cubana de Pilotes
2. Para espaciamentos mayores a 5 Diámetros la eficiencia de grupo es mayor al 95 %, por lo que pudiera considerarse que para espaciamentos mayores a estos se considere la eficiencia de grupo 1.
3. Para espaciamentos menores a 3 Diámetros, los valores de eficiencia son del 80%, pero en ningún caso se reporta el fallo en grupo, por lo que es necesario un modelo de mayor complejidad para evaluar este efecto.

3.5 Modelación del fallo en grupo

Para la modelación del fallo en grupo de proceder a la modelación de una cimentación sobre pilotes con el software PLAXIS 3D

Tabla 3.4: Parámetros utilizados en el análisis.

Parámetro	Cabezal	Pilote
Módulo General de Deformación, E : MPa	34000	23500
Coefficiente de Poison	0.2	0.2
Espesor/ Diámetro, m	2.5	0.9
Cantidad	1	4

El suelo se consideró un suelo homogéneo con cohesión 20 kPa y ángulo de fricción interna de 32 grados. El espaciamiento entre pilotes se modelo 2.5 diámetro.

En la Figura 3.25 se puede observar el modelo de la cimentación realizado en el programa PLAXIS y en la Figura 3.26 se presenta la curva Carga vs Deformación obtenida como resultado del análisis. Se obtuvo un asentamiento de 0.335 m.

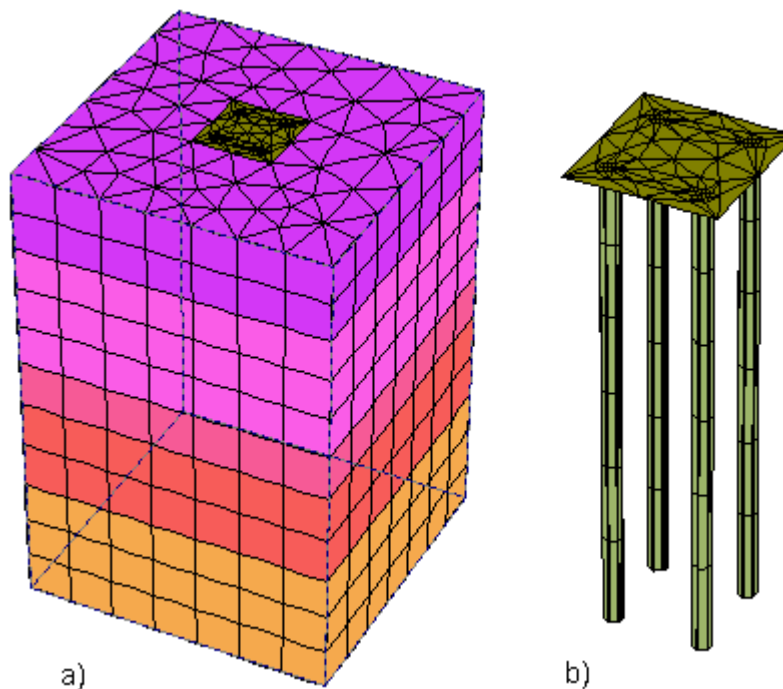


Figura 3.25: Modelación de las capas de suelo (a) y la cimentación con cabezal (b).

Capítulo 3. Análisis del efecto de la fricción negativa y el fallo en grupo en cimentaciones sobre pilotes

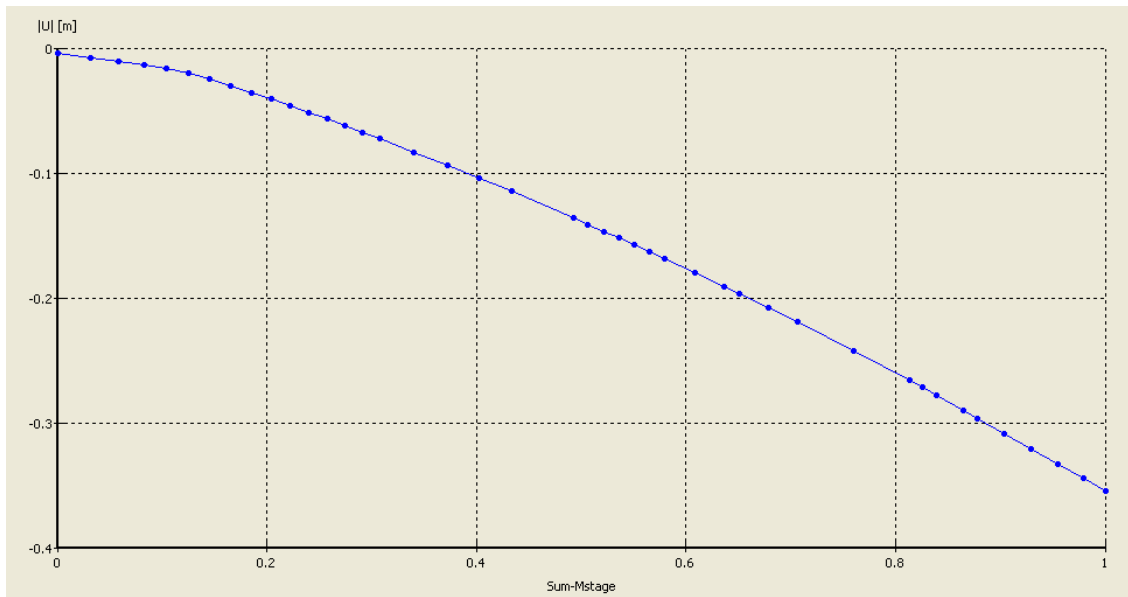


Figura 3.26: Curva carga vs Deformación obtenida para una profundidad de cimentación de 0 m.

Los valores de asentamiento obtenidos para esta cimentación con el uso de las hojas de cálculo programadas en MathCad y el Tief fueron similares como se puede observar en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Asentamiento obtenido con el uso de varios programas.

Programa Utilizado	Asentamiento (cm)
PLAXIS	33.50
Tief	37.94
MathCad	36.62

Como se aprecia no se alcanza el fallo en bloque, debiéndose acudir a otro modelo con menor espaciamiento o con mayor número de pilotes.

Aunque no es una conclusión demostrada, el modelar con estos softwares el cabezal apoyado sobre el terreno, influye de manera positiva al incrementar la capacidad de carga, teniendo en el aporte del cabezal, de manera similar a como ocurre en balsas combinadas con pilotes. Modelos más complejos podría despreciar este efecto,

3.6 Conclusiones Parciales

Una vez analizada el trabajo en grupo de cimentaciones sobre pilotes y la fricción negativa se puede llegar a las siguientes conclusiones:

1. El uso de softwares para el análisis y diseño de cimentaciones sobre pilotes, basados en métodos numéricos pueden ser utilizados para el análisis del trabajo en grupo y fricción negativa en pilotes.
2. Para pilotes que atraviesan suelos consolidables, y cuyo modulo general de deformación sea mayor a 5500 kPa se debe evaluar el espesor de suelo consolidable que genera fricción negativa, pudiendo reducirse su efecto hasta un 11%.
3. Los resultados obtenidos con la modelación matemática son similares a las expresiones teóricas para el cálculo de la eficiencia de grupo.

Conclusiones y Recomendaciones

CONCLUSIONES

En este trabajo han sido investigadas diferentes problemáticas relacionadas con el diseño geotécnico y estructural de cimentaciones sobre pilotes, llegando a conclusiones específicas en cada uno de ellos. A continuación, se hace énfasis en aquellas conclusiones, que engloban el aporte de este trabajo al tema objeto de estudio:

- A través de la modelación matemática se puede modelar el comportamiento de pilotes trabajando en grupo y la fricción negativa.
- Para pilotes que atraviesan suelos consolidables, y cuyo modulo general de deformación sea mayor a 5500 kPa se debe evaluar el espesor de suelo consolidable que genera fricción negativa, pudiendo reducirse su efecto hasta un 11%.
- Los resultados obtenidos con la modelación matemática son similares a las expresiones teóricas para el cálculo de la eficiencia de grupo.

RECOMENDACIONES

No obstante, los resultados obtenidos en esta investigación, todavía quedan varios aspectos del diseño de cimentaciones sobre pilotes que deben ser trabajados con mayor profundidad. Como recomendaciones y futuras líneas de investigación que continúen la presentada en este trabajo se pueden destacar las siguientes:

1. Evaluar en un mayor número de casos el efecto de la fricción negativa
2. Estudiar el fenómeno de fallo en grupo con softwares más precisos y evaluando el aporte del terreno bajo el cabezal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alemán, A. F. "Confección de la Propuesta de Norma de Diseño Geotécnico de Cimentaciones sobre Pilotes."
2. Arenas, L. (2007). Sistema de Cimentación en placa pilote. Análisis de interacción Suelo–Estructura para Suelos del Valle de Aburrá, Tesis de Maestría Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
3. Babu, G. and V. P. Singh (2009). "Simulation of soil nail structures using PLAXIS 2D." Plaxis Bulletin Spring issue: 16-21.
4. Bolognesi, A. (2003). "Ensayos de Carga Estáticos de Compresión en Pilotes de Hormigón Moldeados en Sitio. Curva hiperbólica que mejor se ajusta a los valores medidos." Boletín de la Sociedad Argentina de Ingeniería Geotécnica. N 43: 23-36.
5. Bowles, J. E. (1988). Foundation analysis and design.
6. Brinkgreve, R., R. Al-Khoury, et al. (2004). "Versión 8 Manual de Referencia."
7. Caballero, C. R. (2007). "Evaluación numérico experimental del comportamiento bajo carga axial de pilotes."
8. Christensen, D. S. (2006). "Full scale static lateral load test of a 9 pile group in sand."
9. Das, B. M. (2006). Principios de ingeniería de cimentaciones, Cengage Learning.
10. Davidian, Z. (1982). Pilotes y cimentaciones sobre pilotes, Reverte.
11. Davisson, M. (1993). "Negative skin friction in piles and design decisions."

12. DE HORMIGÓN MOLDEADOS, E. S. (2003). "ENSAYOS DE CARGA ESTÁTICOS DE COMPRESIÓN EN PILOTES." Boletín Sociedad. Argentina de Ingeniería Geotécnica (43): 13-22.
13. De Kuitert, J. and F. Beringen (1979). "Pile foundations for large North Sea structures." Marine Georesources & Geotechnology 3(3): 267-314.
14. del Distrito Federal, G. (2004). "Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de cimentaciones." Gaceta Oficial del Distrito Federal, 6th October, VII(103-BIS): 11-13.
15. del Distrito Federal, G. (2004). "Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto." Reglamento de Construcciones del Distrito Federal. México DF.
16. El-Mossallamy, Y. M., A. M. Hefny, et al. (2013). "Numerical analysis of negative skin friction on piles in soft clay." HBRC Journal 9(1): 68-76.
17. Fellenius, B. H. (1980). "The analysis of results from routine pile load tests." Ground Engineering 13(6): 19-31.
18. Figueroa Díaz, G. E., F. A. Rodríguez Aguilar, et al. (2011). Análisis y diseño de estructuras de retención de aplicación reciente en El Salvador, Universidad de El Salvador.
19. Freire-Tellado, M. J., J. A. Fitera, et al. (2015). Mecánica del suelo y cimentaciones: ejercicios resueltos, Departamento de Tecnología da Construcción.
20. Gómez, C., A. Barbat, et al. (2000). "Vulnerabilidad de puentes de autopista. Un estado del arte." Monografía IS41.
21. GONZÁLEZ, Y. V., L. A. L. Valencia, et al. (2012). "Aplicaciones adicionales de los resultados de pruebas de carga estáticas en el diseño geotécnico de cimentaciones." Dyna 79(175): 182-190.

22. Hanson, R. P. W. (1983). Ingeniería de cimentaciones, Capítulos.
23. Hernández Carrillo, R. (2011). Análisis de pilotes cargados lateralmente, mediante interacción suelo estructura, empleando una teoría simplificada de empujes/Laterally loaded piles analysis, by soil structure interantion, using a simplified pressure theory, Universidad Nacional de Colombia.
24. Hewitt, V. (2011). Posibles efectos de la fricción negativa en pilotes inducida por el fenómeno de subsidencia en suelos de Bogotá, Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia.
25. Hewitt Valbuena, V. M. Posibles efectos de la fricción negativa en pilotes inducida por el fenómeno de subsidencia en suelos de Bogotá, Universidad Nacional de Colombia.
26. Ibáñez, L. (2001). "Análisis del comportamiento geotécnico de las cimentaciones sobre pilotes sometidas a carga axial mediante la modelación matemática." Dr. Ing. Gilberto Quevedo Sotolongo, tutor--TGC.
27. Ibáñez, L. and G. Quevedo (2011). "Propuesta de Norma Cubana para el diseño de cimentaciones sobre pilotes." Oficina Nacional de Normalización. Habana. Cuba 29.
28. Ibáñez, M. (2000). "Algunas recomendaciones para la modelación de problemas tensión deformación en cimentaciones sobre pilotes." Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño Estructural, N°1626, Barcelona, España.
29. Indraratna, B., A. Balasubramaniam, et al. (1992). "Development of negative skin friction on driven piles in soft Bangkok clay." Canadian Geotechnical Journal 29(3): 393-404.
30. Labad, F. M. (2007). Mecánica del suelo y cimentaciones, Fundación Escuela de la Edificación.

31. Laloui, L., M. Nuth, et al. (2006). "Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile." *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics* 30(8): 763-781.
32. Leiva, A. O. M. (2010). "Monografía: Recomendaciones para la modelación por el Método de los Elementos Finitos."
33. LÓPEZ, D. M. J. M. (2007). "Comportamiento y Diseño de Cimentaciones Profundas en la Ciudad de México."
34. Lorenzo, R., R. P. da Cunha, et al. "Aplicación de la teoría de seguridad al diseño geotécnico de losas sobre pilotes Application of the safety theory to the geotechnical design of piled raft foundations."
35. Lorenzo, R., R. P. da Cunha, et al. (2013). "Aplicación de la teoría de seguridad al diseño geotécnico de losas sobre pilotes." *Revista ingeniería de construcción* 28(3): 251-265.
36. Luis, D. S. (2010). "Diseño de cimentaciones sobre pilotes."
37. Martínez, S. (2011). Método de análisis simplificado para un nuevo tipo de cimentación en suelos blandos, Tesis doctoral, Posgrado de Ingeniería, UNAM. En proceso.
38. McClelland, B., J. A. Focht Jr., et al. (1969). "PROBLEMS IN THE DESIGN AND INSTALLATION OF OFFSHORE PILES." *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div* 95(6913 Proceeding).
39. Medina, J. (1989). "Comportamiento de Cimentaciones Sobre Pilotes de Fricción." Trabajo presentado en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, para obtener el Grado de Maestría en Ingeniería 3.
40. Melgarejo, Y. S. (2016). "Aplicación de la prueba de integridad de pilotes en puentes de Cayo Cruz, Camagüey."

41. Mendoza, C., A. M. Ramos, et al. (2012). "Análisis del proceso constructivo y variabilidad de parámetros geotécnicos en la capacidad de carga de micropilotes usando elementos finitos aleatorios." *Obras y proyectos* (11): 61-70.
42. Mendoza López, M. (2007). "Comportamiento y diseño de cimentaciones profundas en la ciudad de México." *Academia de Ingeniería* (www. ai. org. mx). México DF.
43. Mendoza, M. J., M. P. Romo, et al. (2004). "Behaviour of a friction-piled box foundation for an urban bridge in Mexico City clay."
44. MIEI, B. A. M. B. B. (2002). *Experimental investigations of driven pile group behaviour in Belfast soft clay*, Trinity College Dublin.
45. Mora, L. O. I. "Estudio de la Fricción negativa en Pilotes. Aplicación en un problema Real."
46. Mora, L. O. I. (2001). "ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DE LAS CIMENTACIONES SOBRE PILOTES SOMETIDAS A CARGA AXIAL MEDIANTE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA.
47. Mora, L. O. I., G. Q. Sotolongo, et al. (2000). "Análisis de la Interacción Cabezal/Suelo en Cimentaciones sobre Pilotes." *Simpósio Interação Estrutura-Solo em Edifícios*, USP, São Carlos.
48. Moreno Silva, J. M. (2014). *Sistema de cimentación en placa-pilotes. análisis de interacción suelo-estructura, para un edificio de 12 pisos y sótano en la ciudad de Bogotá*, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
49. Muqtadir, A. and C. S. Desai (1986). "Three-dimensional analysis of a pile-group foundation." *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics* 10(1): 41-58.
50. Oñate, E., F. Zárata, et al. (2002). "APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS AL DISEÑO DE CIMENTACIONES PILOTEADAS."

51. Padrón, M. R. (2012). ": Ensayos de carga en cimentaciones sobre pilotes."
52. PÉREZ CARBALLO, P. (2010). "Implementación informática para el cálculo de pilotes de hormigón "in situ" según el código técnico de la edificación." Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla.
53. Ramírez, A. S., R. M. Piralla, et al. (1998). "El uso de modelos de elemento finito en el proyecto de rehabilitación de la catedral y el sagrario de la Ciudad de México."
54. Rebolledo, J. F. R. and G. Auvinet "Modelado numérico del comportamiento de un pilote sometido a fricción negativa y cargas accidentales."
55. Redolfi, E. R. (2007). "Suelos colapsables." Informe del Área de Geotecnia de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.
56. Rodríguez Padrón, M. (2012). Ensayos de carga en cimentaciones sobre pilotes, Universidad Central" Marta Abreu" de las Villas.
57. Saha, A. (2015). "The Influence of Negative Skin Friction on Piles and Pile Groups & Settlement of existing Structures." International Journal on Emerging Technologies 6(2): 53.
58. SÁNCHEZ-MORENO, J., E. PRATES, et al. Evaluación de la capacidad de carga de pilotes de succión para TLPs en el entorno de aguas profundas, Instituto Mexicano del Petróleo.
59. Soviéticas, N. (1979). "Cimentaciones sobre pilotes." Normas Soviéticas. sl, octubre.
60. Sultana, N. K. Z. and F. Akter (2016). "Pile Load Testing and Determining Bearing Capacity of Cast in Situ Pile: A Case Study." Global Journal of Research In Engineering 16(4).
61. Surcharge, F., N. HoN-KwoNG, et al. "Asian Information Center for Geotechnical Engineering. 63."

62. Virella Crespo, J. C. and D. Wendichansky (2002). Efecto de la interacción suelo pilote (ISP) lineal y no lineal en el modelo sísmico de fundaciones de puentes. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil: 55-68.