

**EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE PILOTES MEDIANTE LA  
TECNICA DE ELEMENTOS FINITOS**

**DIANA MARCELA PALACIOS VALENCIA  
MALORY ROJAS CASTELLANOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2012**

**EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE PILOTES MEDIANTE LA  
TECNICA DE ELEMENTOS FINITOS**

**DIANA MARCELA PALACIOS VALENCIA  
MALORY ROJAS CASTELLANOS**

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

**Director:  
VLADIMIR ERNESTO MERCHAN JAIMES  
I.C., M.I.-G, D.I.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2012**

## **DEDICATORIA**

*Dedicado a Dios que me acompañó constantemente y me guió en los buenos y malos momentos.*

*A mis padres Cristian Rojas García y Luz Mary Castellanos que me dieron su apoyo incondicional y su paciencia en esta etapa de mi vida  
A mis hermanas y familia que me brindaron la motivación y el cariño en cada instante.*

*A Cesar Cruz por brindarme todo el amor y estar a mi lado siempre sin importar las circunstancias, logrando construir nuestro granito de arena que siempre soñamos.*

*A mi compañera de proyecto y amiga Diana Palacios por su motivación, alegría y compañerismo que siempre me brindo*

*A mi amiga Pamela Soto y demás amigos que hicieron de esta etapa algo inolvidable gracias a todo su cariño y sincero apoyo, llevándolos siempre presentes.*

**MALORY ROJAS CASTELLANOS**

*En primer lugar quiero agradecer a Dios, por permitirme llegar hasta este momento tan importante para mi vida, por guiarme y ofrecerme la oportunidad de adquirir y afianzar mis conocimientos sin desfallecer ante los obstáculos.*

*A mis padres Luz Stella Valencia Cáceres y José Ignacio Palacios Castillo, por ser mi apoyo y mi motivación cada día para culminar satisfactoriamente este propósito, por brindarme todo su amor y paciencia.*

*A mis hermanos Johanna y Sergio por su valiosa compañía durante todos estos años, y permitirme valorar cada instante de su compañía tan importante para mí, por su cariño y comprensión.*

*A mis amigos por todos los buenos momentos inolvidables que hemos pasado durante esta etapa universitaria, por la compañía de todos y de cada uno, la cual es muy especial para mi vida, ya que cada uno aporta felicidad y alegría.*

**DIANA MARCELA PALACIOS VALENCIA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan su agradecimiento a:

Universidad Industrial de Santander, por permitirnos crecer académica y personalmente.

Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander y su personal docente, por contribuir exitosamente con nuestra formación profesional.

Ing., M. Sc Vladimir Merchán James, director de proyecto, a quien agradecemos por el tiempo brindado, disposición y asesoría.

Familiares y amigos por la alegría de contar con su presencia, cariño, y comprensión.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCION	18
OBJETIVOS	20
1. MARCO TEORICO	21
1.1. Cimentaciones profundas	21
1.1.1 pilotes	22
1.1.1.1. Pilotes de acero:	23
1.1.1.2. Pilotes en concreto	24
1.1.1.3. Pilotes en madera	26
1.1.1.4. Pilotes hincados	27
1.1.1.5. Pilotes pre-excavados:	27
1.2. Metodo de elementos finitos	28
1.3. Informacion general del software	29
2. COMPORTAMIENTO DE PILOTES CARGADOS VERTICALMENTE	32
2.1. Efecto del pilote-pre excavado en el suelo	32
2.2. Carga de hundimiento del pilote aislado	33
2.2.1. Método de poulos y davis.	33
2.2.2. Pilotes en arcillas	34
2.3. Analisis de esfuerzos y desplazamientos entre el suelo y el pilote	36
2.4. Pilotes en arenas	42
2.5. Analisis de esfuerzos y desplazamientos entre el suelo y el pilote	46
3. COMPORTAMIENTO DE PILOTES CARGADOS LATERALMENTE	53
3.1. Analisis por carga última empleando el metodo de broms (1965)	54
3.2. Pilotes en suelos cohesivos	55
3.3. Pilotes en suelo granulares	59
3.4. Analisis de esfuerzos y desplazamientos entre el suelo y el pilote	62
4. CAPACIDAD ÚLTIMA VERTICALY ASENTAMIENTOS DE UN GRUPO DE PILOTES	76
4.1. Capacidad última de carga vertical	81
5. CAPACIDAD ÚLTIMA HORIZONTAL ASENTAMIENTOS DE UN GRUPO DE PILOTES	83
5.1. Carga última aplicada horizontal	83
6. CONCLUSIONES	87
BIBLIOGRAFIA	96

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1: Condiciones para el uso de cimentaciones con pilotes	22
Figura 2: <i>Pilotes de acero</i>	23
Figura 3: Pilotes prefabricados con refuerzo ordinario	24
Figura 4: <i>Empalme de pilotes en madera</i>	26
Figura 5: <i>Factor de adhesión <math>c_a/c_u</math></i>	34
Figura 6: Factor de capacidad de carga $n_c$ , (skempton, 1951)	35
Figura 7: <i>Factor <math>n_q</math></i>	35
Figura 8: Esquema de pilote cargado verticalmente en suelo arcilloso en condiciones drenadas	36
Figura 9. Diagrama de desplazamientos verticales plaxis (suelos arcillosos en condiciones drenadas)	39
Figura 10: Esquema de pilote cargado verticalmente en suelo arcilloso en condiciones no drenadas	40
Figura 11. Diagrama de desplazamientos verticales plaxis (suelos arcillosos en condiciones no drenadas)	42
Figura 12: Capacidad de carga para pilotes en suelos granulares	43
Figura 13: Determinación del valor de $k_{ST} \tan \phi \alpha'$	44
Figura 14: Esquema de pilote cargado verticalmente en suelo granular	46
Figura 15. Diagrama de desplazamientos verticales plaxis sin interfaz (suelos granulares)	50
Figura 16. Diagrama de desplazamientos verticales plaxis con interfaz (suelos granulares)	51
Figura 17. Diagrama de desplazamientos verticales plaxis elasto-plastico sin interfaz (suelos granulares)	51
Figura 18: Variación de la deflexión, momento y fuerza cortante en pilotes a) cortos o rígidos b) largos o elásticos.	54
Figura 19: Pilote corto en suelo cohesivo cargado lateralmente	56

Figura 20: Resistencia lateral ultima para pilotes cortos en suelos cohesivos	57
Figura 21: Pilote largo en suelo cohesivo cargado lateralmente	57
Figura 22: Resistencia lateral ultima para pilotes largos en suelos cohesivos	58
Figura 23: Pilote corto en suelo granular cargado lateralmente	59
Figura 24: Resistencia lateral última para pilotes cortos en suelos granulares	60
Figura 25: Pilote largo en suelo granular cargado lateralmente	61
Figura 26: Resistencia lateral última para pilotes largos en suelos granulares	61
Figura 27: Esquema de pilote cargado lateralmente en suelo cohesivo	62
Figura 28. Diagrama de desplazamientos horizontales plaxis para carga lateral de 1 kn (suelo cohesivo)	69
Figura 29. Diagrama de desplazamientos horizontales plaxis para carga lateral de 10 kn(suelo cohesivo)	70
Figura 30. Diagrama de desplazamientos horizontales plaxis para carga lateral de 100 kn(suelo cohesivo)	70
Figura 31. Diagrama de desplazamientos horizontales plaxis para carga lateral de 1000 kn(suelo cohesivo)	71
Figura 32: Esquema de pilote cargado lateralmente en suelo granular	71
Figura 34. Diagrama de desplazamientos horizontales plaxis para carga lateral de 10kn(suelo granular)	74
Figura 35. Diagrama de desplazamientos horizontales plaxis para carga lateral de 100 kn(suelo granular)	75
Figura 36. Diagrama de desplazamientos horizontales plaxis para carga lateral de 1000 kn(suelo granular)	75
Figura 37: Esquema de grupos de pilote cargado verticalmente en suelo granular	76
Figura 38. Diagrama de desplazamientos verticales en grupo de pilotes plaxis ( suelo granular)	78
Figura 39: Esquema de grupo de pilotes cargado verticalmente en suelo arcilloso en condiciones drenadas	78
Figura 40. Diagrama de desplazamientos verticales en grupo de pilotes plaxis ( suelo cohesivo en condiciones drenadas)	80
Figura 41: Esquema de grupos de pilotes cargado verticalmente en suelo cohesivo en condiciones no drenadas	80

Figura 42. Diagrama de desplazamientos verticales en grupo de pilotes plaxis ( suelo cohesivo en condiciones no drenadas)	82
Figura 43. Esquema de grupos de pilotes cargado horizontalmente	83
Figura 44. Diagrama de desplazamientos horizontales en grupo de pilotes plaxis para carga lateral de 1000 kn (suelo granular)	85
Figura 45 diagrama de desplazamientos horizontales en grupo de pilotes plaxis para carga lateral de 1000 kn (suelo cohesivo)	86

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1: Factor de rigidez	44
Tabla 2: Consistencia de suelo vs ct	45

## LISTA DE GRAFICAS

	<b>Pág.</b>
Grafica 1: Fuerza/desplazamiento para pilote en interacción con arena	88
Grafica 2: Fuerza/desplazamiento para pilote en interacción con arcilla drenada	88
Grafica 3: Fuerza/desplazamiento para pilote en interacción con arcilla no drenada	89
Grafica 4:Fuerza/desplazamiento para pilote en interacción con suelo cohesivo	91
Grafica 5: Fuerza/desplazamiento para pilote en interacción con suelo granular	92

## RESUMEN

**TITULO:** EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE PILOTES MEDIANTE LA TECNICA DE ELEMENTOS FINITOS.

**AUTORES:** \*MALORY ROJAS CASTELLANOS  
DIANA MARCELA PALACIOS VALENCIA

**PALABRAS CLAVES:** PILOTES, DEFORMACION, ASENTAMIENTOS, ELEMENTOS FINITOS, SUELO, HERRAMIENTA COMPUTACIONAL (PLAXIS 8,5)

### CONTENIDO:

El presente trabajo se plantea estudiar el comportamiento esfuerzo-deformación del sistema pilote-suelo a través de simulaciones utilizando la técnica de los elementos finitos. Lo anterior, debido a la necesidad de una mejor comprensión de éste sistema acoplado, teniendo en cuenta que no existe una metodología única para el análisis de dicho sistema. De hecho gran cantidad de ellas obedecen a métodos empíricos. Se pretende por lo tanto, mediante un número importante de simulaciones, obtener un mejor entendimiento de los aspectos fundamentales que gobiernan el comportamiento de dichos elementos ante diferentes combinaciones de las condiciones del suelo y del elemento estructural.

Muchas de las estructuras geotécnicas como los refuerzos del suelo y las pilas se utilizan hoy en día para evitar el colapso o deformaciones excesivas de construcciones. En este trabajo se da énfasis en el comportamiento de las cimentaciones profundas y más concretamente del contacto entre un suelo granular y una pila sometidos a su propio peso y bajo cargas de servicio, las pilas generan tensiones en el suelo circundante y tensiones, por medio de dos mecanismos principales: la movilización de la resistencia de base y la fricción lateral, el comportamiento de la pila depende de la importancia relativa compartida entre estos dos componentes entre otros factores como son el tipo de carga aplicada es decir tracción, compresión, lateral; y el tipo de pila y la dimensión, el tipo de suelo, el procedimiento de instalación.

Los resultados presentados en este proyecto serán obtenidos mediante la herramienta computacional PLAXIS 8,5 en dos dimensiones, la cual constituye un paquete de elementos finitos prevista para el análisis de dos dimensiones de la deformación y la estabilidad en la ingeniería geotécnica.

---

\* Proyecto de Grado

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

## SUMMARY

**TITLE:** †PERFORMANCE EVALUATION OF PILES BY FINITE ELEMENT TECHNIQUE.

**AUTHORS:** MALORY ROJAS CASTELLANOS  
DIANA MARCELA PALACIOS VALENCIA

**KEYWORDS:** PILES, DEFORMATION, SETTLEMENTS, FINITE ELEMENTS, FLOOR TOOL COMPUTER (PLAXIS 8.5)

### **CONTENTS:**

The current work intends to study the stress-strain behavior of pile-soil system through simulations using the finite element technique. This was due to the need for a better understanding of this combined system, considering that there is a unique methodology for the analysis of that system. In fact many of them are due to empirical methods. For that reason, we intend to do a large number of simulations in order to gain a better understanding of the fundamentals that govern the behavior of these elements, with different combinations of soil conditions and the structural element.

Many of the geotechnical structures such as soil reinforcements and batteries are used today to prevent collapses or excessive deformation. This paper emphasizes the behavior of deep foundations and more specifically the contact between granular soil and pile under its own weight and under service loads. The piles generate pressure around the surrounding soil, through two main mechanisms: the mobilization of base resistance and side friction. The behavior of the battery depends on the relative importance between these two components shared among other factors such as the type of load applied, tension, compression, lateral, and the pile type and size, soil type and the installation procedure.

The results presented in this project will be obtained using the computational tool PLAXIS 8.5 in two dimensions, which are a finite element package intended for the analysis of two-dimensional deformation and stability in geotechnical engineering. It is a robust finite element package and is easy to use, developed for Geotechnical Engineering.

---

† Graduation Project

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

## INTRODUCCION

El uso de los pilotes es a menudo necesario para garantizar la seguridad estructural y limitar las deformaciones de las fundaciones en todo tipo de estructuras, incluso aquellas de gran aporte como edificios de gran altura, depósitos y demás, particularmente cuando el estrato o estratos superiores del suelo son altamente compresibles y demasiado débiles o deformables para soportar la carga transmitida por la superestructura. Los pilotes son también de uso frecuente cuando existen en el sitio suelos expansivos y colapsables que se hinchan y se contraen conforme varía su contenido de humedad. En tales casos, las cimentaciones con pilotes se usan con éxito si estos se extienden hasta los estratos de suelo estables más allá de la zona de posible cambio del contenido de humedad. En muchos casos los estribos y pilas de puentes están fundados en pilotes para evitar la posible pérdida de la capacidad de carga que una cimentación superficial sufriría, no solo por la deformabilidad o resistencia en condiciones normales, sino también por posible erosión del suelo.

En el medio actual las cimentaciones de muchas estructuras se resuelven utilizando pilotes, entre otras razones por la necesidad de llegar a suelos más competentes o para evitar desplazamientos excesivos. Los procedimientos de diseño comúnmente empleados para estos pilotes implican principalmente la determinación de su capacidad de carga y, en algunos casos, la estimación de la rigidez inicial a través de los modelos y formulas aproximadas. En general, estos procedimientos no permiten definir la relación carga y desplazamiento del pilote que tiene gran influencia en el comportamiento de la estructura principal. Las incertidumbres generadas por esta falta de información son cubiertas mediante la introducción de factores de seguridad.

Este trabajo está orientado al desarrollo de los modelos en elementos finitos mediante el software PLAXIS, que permita una predicción más racional del comportamiento de los pilotes en las etapas de diseño o evaluar el desempeño de este de acuerdo a cargas verticales y horizontales. Esta opción de análisis implica la utilización de un modelo constitutivo para representar el comportamiento del suelo.

En la definición de los modelos numéricos de pilotes debe tenerse en cuenta que los procesos constructivos relacionados a la instalación de pilotes pueden producir variaciones en las propiedades del suelo, y lógicamente esto puede resultar en diferencias entre el comportamiento esperado y el real. Por esta razón en la práctica ingenieril resultan necesarios procedimientos que permitan evaluar el comportamiento de estos elementos estructurales una vez construidos.

## **OBJETIVOS**

### **❖ OBJETIVO GENERAL**

Estudiar la influencia de diferentes variables geotécnicas en el comportamiento esfuerzo-deformación de pilotes.

### **❖ OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudiar la metodología de mecánica del medio continuo para entender el funcionamiento del programa
- Analizar los esfuerzos y desplazamientos entre el suelo y el pilote para hacer comparaciones entre diferentes casos y así deducir el comportamiento de esta interacción de forma general.
- Comparar metodologías clásicas con los resultados de las simulaciones numéricas

## 1. MARCO TEORICO

### 1.1. CIMENTACIONES PROFUNDAS

Son aquellos elementos que transmiten la carga de una estructura hacia capas o estratos profundos del subsuelo, evitando con ello, el desplante en suelos superficiales de baja capacidad de carga o de alta deformabilidad.

Las cimentaciones profundas se emplean:

- Cuando los estratos superficiales del suelo son altamente compresibles y/o de escasa capacidad de carga.
- Cuando se requiere mejorar el comportamiento de cimentaciones en estructuras sujetas a carga lateral, ya sean edificios altos con cargas de viento y/o sismo o estructuras de retención de tierra.
- En suelos superficiales inestables (expansivos, colapsables), siempre y cuando la cimentación profunda se extiende más allá de la zona activa de expansión o de cambios en el contenido de agua.
- Para soportar fuerzas de levantamiento en estructuras sujetas a este efecto, como torres de transmisión, plataformas fuera de costa y losas de cimentación debajo del nivel freático.
- Para evitar la posible pérdida de capacidad de carga de pilas y estribos de puentes que una cimentación superficial sufriría por erosión (socavación) del suelo en la superficie.

#### ***Tipos de cimentaciones profundas:***

- Pilotes
- Pilas

- Cajones

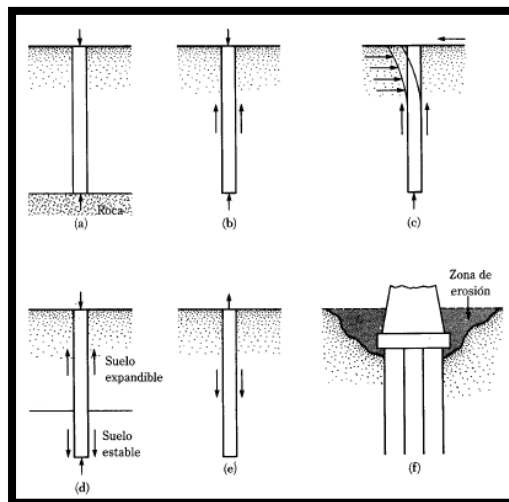
A continuación nos enfocaremos únicamente en el estudio del comportamiento de pilotes cumpliendo con el objetivo de nuestra investigación.

### 1.1.1 Pilotes

Los pilotes son miembros estructurales hechos de acero, concreto y/o madera y son usados para construir cimentaciones cuando son profundas y cuestan más que las cimentaciones superficiales. A pesar del costo, el uso de pilotes es a menudo necesario para garantizar la seguridad estructural.

Los pilotes transmiten la carga al subsuelo por una combinación de presión en la punta (capacidad de punta) y por esfuerzo de fricción a los largo del fuste del pilote (Capacidad por fricción)

**Figura 1: Condiciones para el uso de cimentaciones con pilotes**



*Fuente: Principio de ingeniería de cimentaciones (BRAJA. DAS)*

## Tipos de pilotes y sus características estructurales

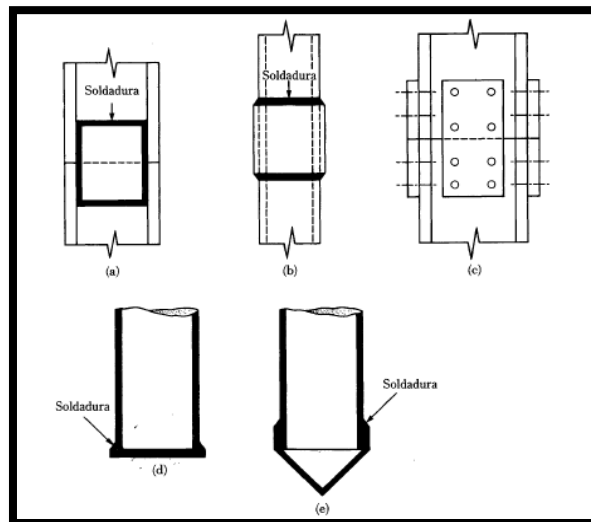
- Por el tipo del material del pilote

**1.1.1.1. Pilotes de acero:** Son generalmente pilotes a base de tubos o de perfiles H laminados. Los pilotes de tubo se hincan en el terreno con sus extremos abiertos o cerrados. Las vigas de acero de patín ancho y de sección I también se usan. Sin embargo se prefieren los perfiles H porque los espesores de sus almas y patines son iguales.

Los pilotes de acero llegan a estar sometidos a corrosión, como en suelos pantanosos, las turbas y otros suelos orgánicos. Para compensar el efecto de la corrosión se recomienda considerar un espesor adicional de acero.

**Figura 2: Pilotes de acero**

a) *Empalme de pilotes H con soldadura;* b) *empalmes de pilotes de tubo con soldadura;* c) *empalme de pilotes H con remaches y tornillos;* d) *punta plana de hincado de pilote de tubo;* e) *punta cónica de hincado de pilote de tubo.*



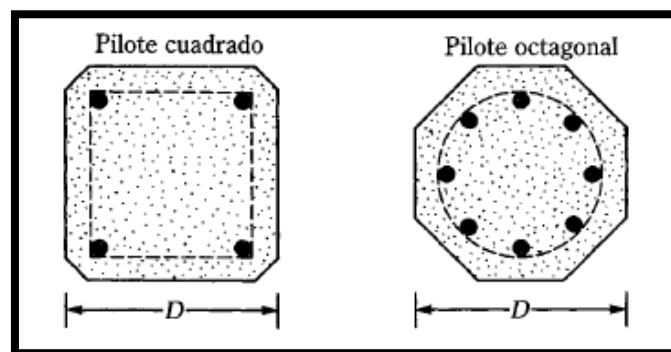
Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones (BRAJA.DAS)

### 1.1.1.2. Pilotes en concreto: se dividen en dos categorías

- **Pilotes Prefabricados:** se prepara usando acero ordinario y son cuadrados u octagonales en su sección transversal. El refuerzo se proporciona para que el pilote resista el momento flexionante desarrollado durante su manipulación y transporte, la carga vertical y el momento flexionante causado por carga lateral. Los pilotes son fabricados a las longitudes deseadas y curados antes de transportarlos a los sitios de trabajo.

También podemos encontrar pilotes prefabricados que son pres forzados empleando cables de pre esfuerzo de acero de alta resistencia. La resistencia ultima de esos cables es de aproximadamente 260 ksi (1800 MN/m<sup>2</sup>). Durante el colapso de los pilotes, los cables se pretensan y se vierte el concreto alrededor de ellos. Después del curado, los cables se recortan produciéndose así una fuerza de compresión en la sección del pilote.

**Figura 3: Pilotes prefabricados con refuerzo ordinario**



*Fuente: Principio de ingeniería de cimentaciones (BRAJA.DAS)*

- **Pilotes colados in situ:** se construyen haciendo una perforación en el terreno y llenándola con concreto. Existen dos amplias categorías

- a) Pilotes ademados: se hacen hincando un tubo de acero en el terreno con ayuda de un mandril colocado dentro del tubo. Cuando el pilote alcanza la profundidad apropiada, se retira el mandril y el tubo se llena de concreto.
- b) Pilotes no ademados: se hacen hincando primero el tubo a la profundidad deseada y llenándolos con concreto fresco. El tubo se retira gradualmente.

Entre las características de los pilotes colocados in situ se encuentran: la longitud usual del pilote está entre 5 a 15 m, la longitud máxima entre 30 a 40 m, la carga usual aplicada oscila entre 20 a 50 Ton y la carga máxima aproximada es de 80 Ton.

Las ventajas de emplear estos pilotes es que son relativamente económicos, de realiza un posible inspección antes de colar y es fácil de extenderlo.

Entre las desventajas esta la posible dificultad en las juntas después del fraguado del concreto y los ademes delgados pueden dañarse durante el hincado.

### ***Carga admisible ( $Q_{adm}$ )***

$$Q_{adm} = A_s f_s + A_c f_c$$

*Dónde:*

*$A_s$  area de la seccion transversal del acero*

*$A_c$  area de la seccion transversal de concreto.*

*$f_s$  esfuerzo admisible de acero*

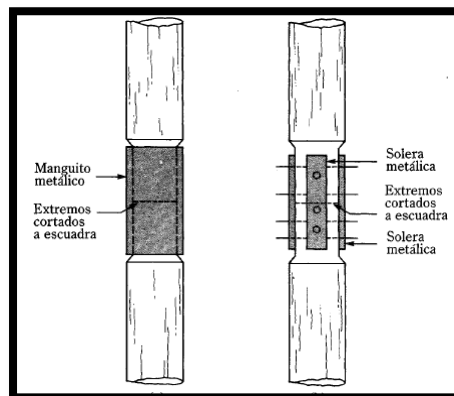
*$f_c$  esfuerzo admisible del concreto*

**1.1.1.3. Pilotes en madera:** los pilotes de madera son troncos de arbole cuyas ramas y corteza fueron cuidadosamente recortadas, la longitud máxima de los pilotes de madera es de entre 30 y 65 pies. Para calificar como pilote, la madera debe ser recta, sana y sin defectos. Según El Manual of Practice No 17(1959) de la American Society of Civil Engineers, lo divide en tres clases:

- *Pilotes Clase A* : pilotes que soportan cargas pesadas, el diámetro mínimo del fuste debe ser de 144 pulg ( 356mm)
- *Pilotes Clase B*: se usan para tomar cargas medias, el diámetro mínimo del fuste debe ser entre 12 y 13 pulg ( 305-330mm)
- *Pilotes Clase C*: se usan en trabajos provisionales de construcción. Estos se usan permanentemente para estructuras cuando todo el pilote esta debajo del nivel freático, el diámetro mínimo del fuste debe ser de 12 pulg(305mm).

Los pilotes de madera se caracterizan por qué no resisten altos esfuerzos al hincarse, porque su capacidad es limitada. Se acostumbra a emplear zapatas de acero para evitar daños en la punta del pilote. En la parte superior del pilote se usan capuchones o cabezales para evitar daños durante el hincado.

**Figura 4: Empalme de pilotes en madera**



*Fuente: Principio de ingeniería de cimentaciones (BRAJA.DAS)*

- Por el procedimiento constructivo

De forma general, atendiendo al modo de colocar el pilote dentro del terreno, se consideran los siguientes:

**1.1.1.4. Pilotes hincados:** La característica fundamental de estos pilotes estriba en el desplazamiento del terreno que su ejecución puede inducir, ya que el pilote se introduce en el terreno sin hacer excavaciones previas que faciliten su alojamiento en el terreno.

Las formas de hincar pilotes puede ser diferentes según se use vibrador o se emplee, como suele ser más frecuente, la hinca o percusión con golpes de maza. Se considerara el pilote hincado de recta cuya profundidad de hinca sea mayor a 8 veces su diámetro equivalente.

Entre los equipos más utilizados para el hinchamiento de los pilotes encontramos:

- 1. Martillos piloteadores** ( martinetes) que se subdividen en:
  - a) Martillo de caída libre
  - b) Martillos de aire o vapor de acción simple
  - c) Martillo de aire o vapor de acción doble y diferencial.
  - d) Martillo diesel.
- 2. Hincadores vibratorios.**
- 3. Hincadores con chorro de agua a gran presión.**

**1.1.1.5. Pilotes pre-excavados:** En este sistema de pilotaje, se remueve del suelo el espacio que va a ocupar el pilote, al aplicar varias posibles técnicas de excavación o perforación , formando así una cavidad que en caso necesario se

protege del derrumbe de sus paredes, en cuyo interior se funde el concreto integrante de cuerpo del pilote.

Se realiza una perforación de la profundidad y sección requerida. En algunos casos, para mejorar la estabilidad de las paredes de la excavación puede emplearse lodo bentonítico. Una vez terminada la perforación y antes de vaciar el concreto es necesario verificar que aquella se encuentre limpia, libre de material suelto y la pared interior este sana y no haya fluido hacia adentro.

En los casos de excavación bajo agua o de utilización de lodo bentonítico, el concreto se vaciara usando el sistema “ tremie” teniendo cuidado de mantener permanentemente el extremo inferior del tubo bajo el concreto para evitar así la segregación.

## **1.2. METODO DE ELEMENTOS FINITOS**

PLAXIS es un programa de ordenador de elementos finitos bidimensionales diseñado específicamente para la realización de análisis de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos. El programa utiliza una interfaz gráfica que permite a los usuarios generar rápidamente un modelo geométrico y una malla de elementos finitos basada en una sección transversal vertical representativa del problema que se trate.

El método de los elementos finitos es un método de aproximación de problemas continuos, de tal forma que:

- El continuo se divide en un número finito de partes, “elementos”, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros

asociados a ciertos puntos característicos denominados “nodos”. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.

- La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación o funciones de forma.

El MEF o FEM, por lo tanto, se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

### **1.3. INFORMACION GENERAL DEL SOFTWARE**

PLAXIS es un programa de ordenador de elementos finitos bidimensionales diseñado específicamente para la realización de análisis de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos. Las situaciones modelables corresponden a problemas de deformación plana o como axisimetría. El programa utiliza una interfaz gráfica que permite a los usuarios generar rápidamente un modelo geométrico y una malla de elementos finitos basada en una sección transversal vertical representativa del problema que se trate.

El programa despliega una serie de posibles materiales de estrato, como son arenas, arcillas, limos y demás, los cuales muestran por defecto características generales de estos, que pueden ser modificadas si se prefiere.

A continuación mostraremos las opciones que nos presenta el programa para la simulación del modelo.

Project Database

Empleado para

Set type:

Tipo de elemento  
Simulado

- Soil & Interfaces Estrato de Suelo
- Plates → Elemento estructural (Pilote)
- Geogrids
- Anchors

En la selección para modelar el tipo de suelo, escogemos la opción Soil & Interfaces, a continuación mostraremos una tabla resumen con el menú desplegado por PLAXIS, manejando siempre las opciones subrayadas, y el material Mohr- Coulomb

General				
MATERIAL SET		Material Tipe	General Properties	Permeability
Material model:				
1	<u>Mohr- Coulomb</u>	Drained	$\gamma_{unsat} [KN/m^3]$	$k_x [m/day]$
2	Soft soil model	UnDrained	$\gamma_{sat} [KN/m^3]$	$k_y [m/day]$
3	Hardening soil model	Non-porous		
4	HS small			
5	Modified Cam-Clay			
6	Soft Soil Creep Model			
7	Jointed Rock Model			
8	User-defined model			

Parameters				
	Stiffness	Alternatives	Strength	Velocities
1	$E_{ref} [KN/m^2]$	$G_{ref} [KN/m^2]$	$C_{ref} [KN/m^2]$	$V_s [m/s]$
2	$\nu(nu)$	$E_{oed} [KN/m^2]$	$\varphi(phi)[^\circ]$	$V_p [m/s]$
3			$\Psi(phi)[^\circ]$	

Para modelar el material del elemento estructural escogemos la opción Plates y el siguiente es el menú desplegado en cual seleccionamos Lesson 6- Pile Toe, que contiene la información básica del Pilote.

#### Global database

- Lesson 1 – Footing
- Lesson 2 - Diaphragm wall
- Lesson 3 - Diaphragm wall
- Lesson 4 - Foundation
- Lesson 5 – Lining
- Lesson 6 - Pile Toe

	Material sets	Plate Properties
1	Elastic	$EA [KN/m]$
2	Elastoplastic	$EI [KNm^2/m]$
3	Hardening soil model	$d [m]$
4	HS small	$w [KN/m/m]$
5	Modified Cam-Clay	$\nu$
6	Soft Soil Creep Model	$M_p [KNm/m]$
7	Jointed Rock Model	$N_p [KN/m]$
8	User-defined model	$Rayleigh \propto$
9		$Rayleigh \beta$

## **2. COMPORTAMIENTO DE PILOTES CARGADOS VERTICALMENTE**

### **2.1. EFECTO DEL PILOTE-PRE EXCAVADO EN EL SUELO**

La forma de distribución de esfuerzos, el asentamiento y capacidad máxima de una cimentación por pilotaje, depende del efecto del pilote en el suelo. El pilote, representado por un cilindro de longitud  $L$  y diámetro  $D$ , es una discontinuidad en la masa de suelo, que reemplaza o desplaza al suelo, según sea instalado o por hinca.

La excavación altera al suelo cambiando la forma de distribución de esfuerzo; el suelo puede ser comprimido hacia adentro, desorganizándose la estructura de las arcillas y reduciéndose la compacidad de las arenas. Al forzar un pilote dentro del agujero o al colocar concreto fresco, puede que se fuerce parcialmente el suelo hacia fuera, originándose más alteración.

Al cargarse al pilote el campo de esfuerzos cambia, porque la carga del pilote se transfiere al suelo.

A continuación se explicara el cálculo de la capacidad de carga y de los asentamientos dependiendo del tipo del suelo y las características del pilote.

Una vez seleccionado el tipo de pilote y los posibles diámetros, el cálculo comprende las fases siguientes:

- Determinación de la carga de hundimiento del pilote aislado para diversas longitudes de implantación, hasta lograr un aprovechamiento adecuado de la resistencia nominal.

- Estimación de los asentamientos correspondientes a la carga admisible o de trabajo
- Estimación de la carga admisible de los pilotes en un grupo y de los asentamientos asociados
- Dimensionamiento estructural del pilote

## 2.2. CARGA DE HUNDIMIENTO DEL PILOTE AISLADO

Despreciando la pequeña diferencia entre el peso del terreno extraído o desplazado y el del hormigón del pilote, la expresión general de la carga de hundimiento empleamos el siguiente método:

### 2.2.1. Método de Poulos y Davis.

Métodos para estimar Capacidad de carga

$$Q_u = Q_{uf} + Q_{up} - W_p$$

$$Q_{up} = A_p (cN_c + \sigma_{vb}N_q + 0,3\gamma DN_\gamma)$$

$$Q_{uf} = \int_0^L P C_a + \sigma_v K_s \tan \phi_a dz$$

Donde

$A_p$  = área del pilote

$c$  = cohesión del suelo en la punta del pilote

$\sigma'_{vb}$  = esfuerzo vertical efectivo en la punta

$N_c, N_q, N_\gamma$  = factores de capacidad de carga

$p$  = perímetro del pilote

$D$  = diámetro del pilote

$C_a$  = adhesión no drenada

$\bar{\sigma}_v$  = esfuerzo vertical efectivo medio en la longitud

$\phi_a$  = ángulo de fricción suelo – pilote.

### 2.2.2. Pilotes en Arcillas

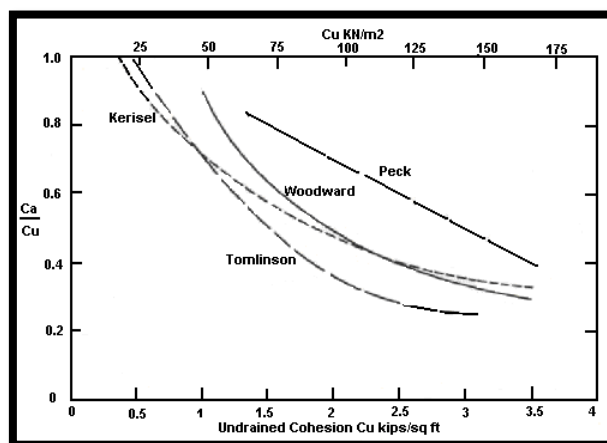
- **Arcillas no drenadas:** La adhesión no drenada  $C_a$  varía considerablemente con el material del pilote, tipo de suelo y la forma de instalación. Lo ideal es realizar pruebas de carga. Como no siempre son posibles, se recurren a valores de  $C_a$  obtenidos experimentalmente, muchos determinados en función de  $C_u$

$$c = C_u; \phi_a = 0; N_\gamma = 0; N_q = 1; \phi = 0$$

$$\text{Tomando: } A_p \sigma'_{vb} \approx W_p Q_u = A_p c_u N_c + \int_0^L P c_a dz$$

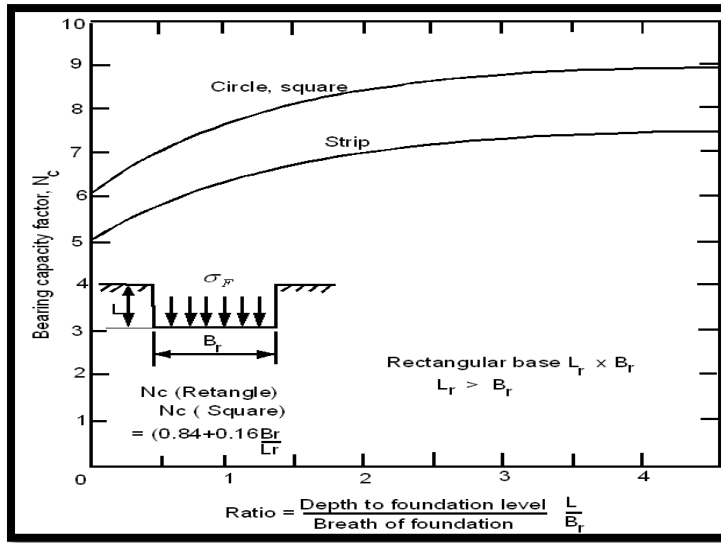
- **Arcillas blandas:** Se propone el uso de la recopilación planteada por McClelland, (1974), en la cual se plantea una variación de  $C_u$  con el factor de adhesión  $C_a/C_u$

Figura 5: Factor de adhesión  $C_a/C_u$



Fuente: *Pile foundation Analysis and design, Poulos Davis*

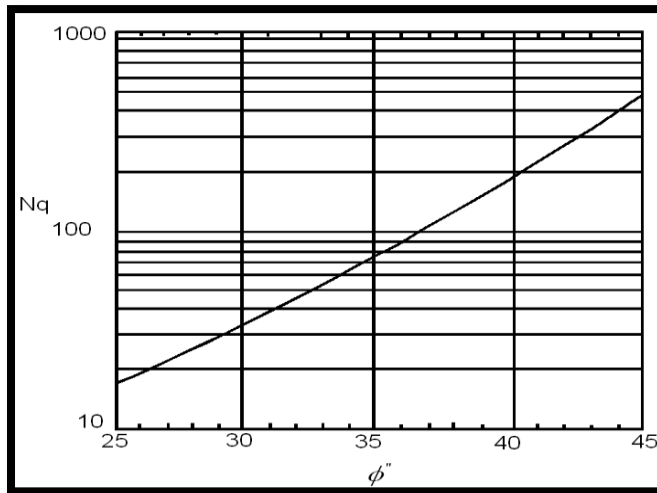
**Figura 6: Factor de capacidad de carga  $N_c$ , (Skempton, 1951)**



*Fuente: Pile foundation Analysis and design, Poulos Davis*

- **Arcillas drenadas:** Para esta condición se asume  $c=0$  por tanto  $C_a=0$ . Se ignoran efectos  $N_c$  y  $N_y$  por ser factores pequeños, por lo tanto:

**Figura 7: Factor  $N_q$**



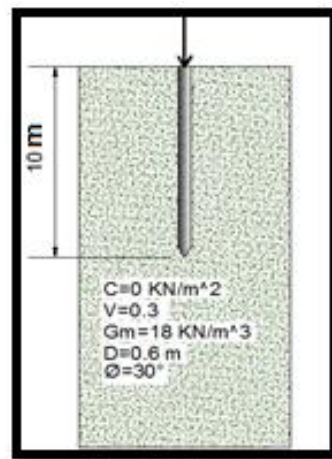
*Fuente: Pile foundation Analysis and design, Poulos Davis*

## 2.3. ANALISIS DE ESFUERZOS Y DESPLAZAMIENTOS ENTRE EL SUELO Y EL PILOTE

CASO 1: SUELOS ARCILLOSO EN CONDICIONES DRENADAS.

### EMPLEANDO METODOLOGIA CONVENCIONALES

Figura 8: Esquema de pilote cargado verticalmente en suelo arcilloso en condiciones drenadas



Fuente: Registro propio

Para calcular la carga última utilizamos la ecuación:

$$Q_u = A_p \sigma_{vb} N_q + \int_0^L P \sigma_{vb} K_s \tan \phi_a dz$$

De la figura 7 encontramos el valor de  $N_q=33$  aproximadamente

Tenemos los siguientes valores:

$$A_p = \pi r^2 = \pi * 0.3^2 \approx 0.283 \text{ m}^2$$

$$P_p = 2\pi r = 2\pi * 0.3 \approx 1.885 \text{ m}$$

$$\sigma'_{vb} = \gamma_m * L = 18 * 10 = 180 \frac{KN}{m^3}$$

$$\sigma_v = \gamma_m * \frac{L}{2} = 18 * 5 = 90 \frac{KN}{m^3}$$

Reemplazamos en la ecuación y obtenemos el valor de la carga última:

$$Q_u = 0.283 * 180 * 33 + \int_0^{10} 1.885 * 90 * 0.289 dz$$

$$Q_u = 2171.309 KN$$

### CALCULO DEL ASENTAMIENTO

$$S = S_a + S_{punta} + S_{fricción}$$

- El desplazamiento elástico es:

$$S_a = Q_{punta} + \frac{2}{3} S_f \frac{L}{A * E_c}$$

$$Q_{punta} = 0.09 * 2171.309 = 195.418 KN$$

Ahora  $S_f = P - Q_{punta} = 2171.309 - 195.418 = 1975.891 KN$

$$S_a = 195.418 + \frac{2}{3} 1975.891 \frac{10}{0.283 * 2E + 09} = 2.673E - 05 m$$

- Desplazamiento por punta:

$$S_{punta} = Ct * \frac{Q_{punta}}{D * Q_{ult}}$$

El intervalo para de Ct lo encontramos en la tabla 2, Ct=0.14

$$Spunta = 0.14 * \frac{195.418}{0.6 * 2171.309} = 0.021 \text{ m}$$

- Desplazamiento por fricción:

$$S_{friccion} = C_s * \frac{S_f}{L * Q_{ult}}$$

Donde

$$C_s = 0.93 + 0.16 \frac{L}{D}^{\frac{1}{2}} * C_t = C_s = 0.93 + 0.16 \frac{10}{.6}^{\frac{1}{2}} * 0.14 = 0.222$$

$$S_{friccion} = 0.222 * \frac{1975.891}{10 * 2171.309} = 0.02 \text{ m}$$

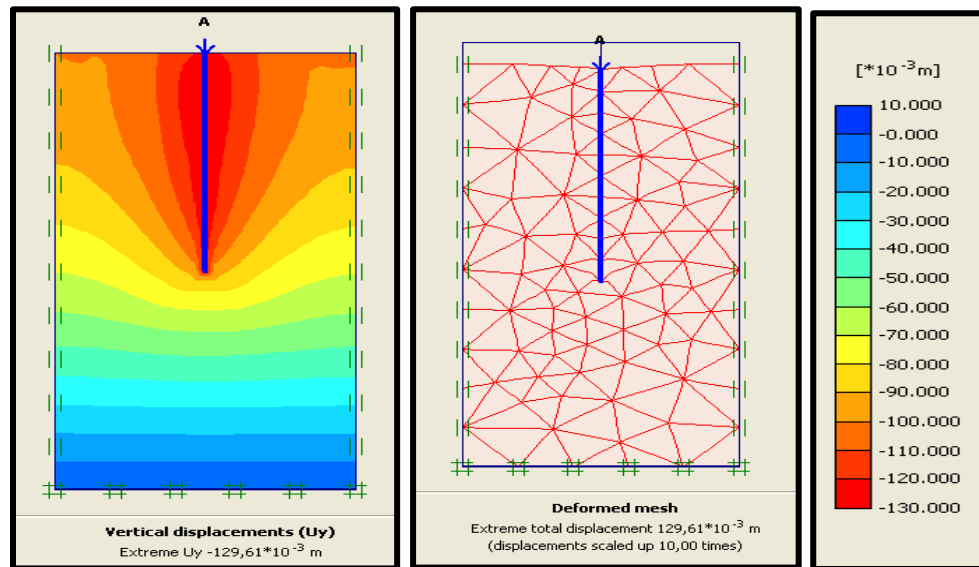
Encontrando de esta forma el asentamiento total:

$$S = 2.673E - 05 + 0.021 + 0.02 \approx 0.041 \text{ m} \approx 4,1 \text{ cm}$$

### **EMPLEANDO METODOLOGIA NUMERICA (PLAXIS)**

Las siguientes graficas fueron extraídas del programa, del menú de resultados donde podemos observar lo desplazamientos verticales.

**Figura 9. Diagrama de desplazamientos verticales plaxis (suelos arcillosos en condiciones drenadas)**



El programa muestra la falla del pilote bajo la aplicación de 1000 KN, y sufre un desplazamiento de  $129,6[10^{-3}m] = 12,96 \text{ cm}$  lo cual muestra gran diferencia con el método convencional pues es de  $4,1 \text{ cm}$ .

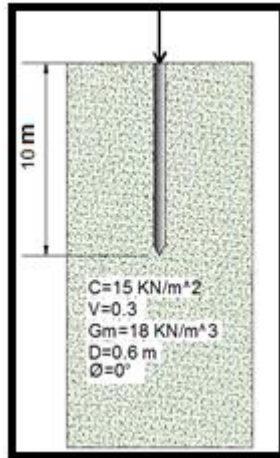
## *CASO 2: SUELOS ARCILLOSO EN CONDICIONES NO DRENADAS*

### **EMPLEANDO METODOLOGIA CONVENCIONALES**

Para calcular la carga última utilizamos la ecuación:

$$Q_u = A_p C_u N_c + \int_0^L P C_a dz$$

**Figura 10: Esquema de pilote cargado verticalmente en suelo arcilloso en condiciones no drenadas**



*Fuente: Registro propio*

De la figura 6 encontramos el valor de  $N_c=9$  aproximadamente  
Tenemos los siguientes valores

$$A_p = \pi r^2 = \pi * 0,3^2 \approx 0,283 \text{ m}^2$$

$$P_p = 2\pi r = 2\pi * 0,3 \approx 1,885 \text{ m}$$

$$C_u = C = 15 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

En la figura 5 encontramos el valor de  $\frac{C_a}{C_u} = 1,07$  aproximadamente, despejando obtenemos que  $C_a=16$

Reemplazando en la ecuación, obtenemos el valor de la carga última:

$$Q_u = 0,283 * 15 * 9 + \int_0^{10} 1,885 * 16 \, dz$$

$$Q_u = 339,805 \text{ KN}$$

### **CALCULO DEL ASENTAMIENTO**

$$S = S_a + S_{\text{punta}} + S_{\text{fricción}}$$

- El desplazamiento elástico es:

$$S_a = Q_{punta} + \frac{2}{3} S_f \frac{L}{A * E_c}$$

$$Q_{punta} = 0.09 * 339.805 = 30.582 \text{ KN}$$

Ahora

$$S_f = P - Q_{punta} = 339.805 - 30.582 = 309.223 \text{ KN}$$

$$S_a = 30.582 + \frac{2}{3} 309.223 \frac{10}{0.283 * 2E + 09} = 4.183E - 6 \text{ m}$$

- Desplazamiento por punta:

$$S_{punta} = C_t * \frac{Q_{punta}}{D * Q_{ult}}$$

El intervalo para de  $C_t$  lo encontramos en la tabla 2,  $C_t=0.14$

$$S_{punta} = 0.14 * \frac{30.582}{0.6 * 339.805} = 0.021 \text{ m}$$

- Desplazamiento por fricción:

$$S_{friccion} = C_s * \frac{S_f}{L * Q_{ult}}$$

Donde

$$C_s = 0.93 + 0.16 \frac{L}{D}^{\frac{1}{2}} * C_t = C_s = 0.93 + 0.16 \frac{10}{.6}^{\frac{1}{2}} * 0.14 = 0.222$$

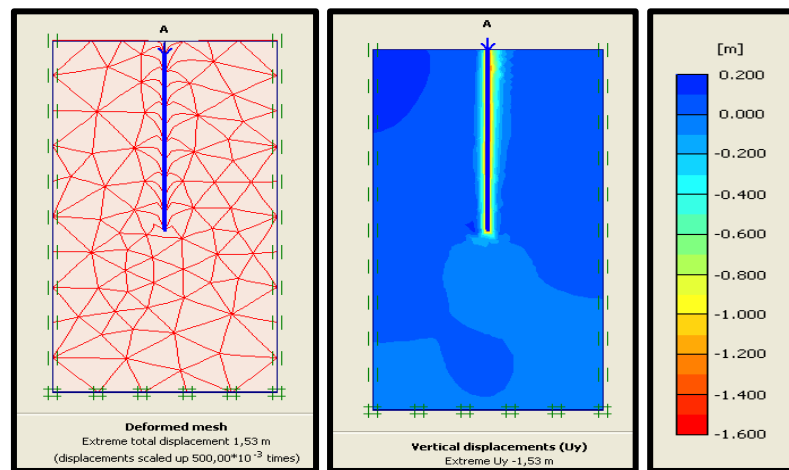
$$S_{friccion} = 0.222 * \frac{309.223}{10 * 339.805} = 0.02 \text{ m}$$

Encontrando de esta forma el asentamiento total:

$$S = 4.183E - 6 + 0.021 + 0.02 \approx 0.03341 \text{ m} \approx 4.1 \text{ cm}$$

## EMPLEANDO METODOLOGIA NUMERICA (PLAXIS)

**Figura 11. Diagrama de desplazamientos verticales plaxis (suelos arcillosos en condiciones no drenadas)**



Mediante el software obtuvimos un valor de falla bajo la carga de 300 KN con un desplazamiento de  $1,53[10^{-3}m] = 0,153 \text{ cm}$  , y empleando la metodología convencional la carga ultima estimada es de aproximadamente 339 KN y el desplazamiento esperado para esta carga es de  $4.1 \text{ cm}$

## **2.4. PILOTES EN ARENAS**

Los resultados experimentales han mostrado que en depósitos de arena el suelo se comporta como si los esfuerzos crecieran linealmente hasta una cierta

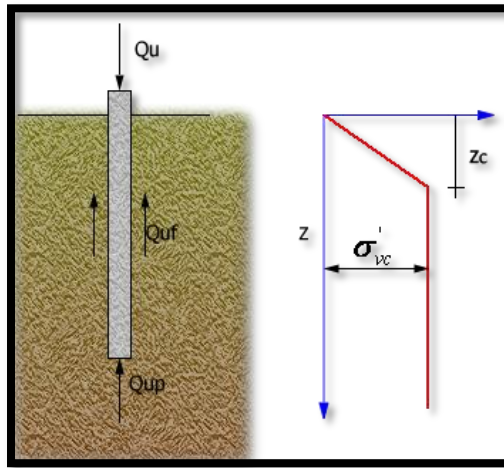
profundidad y posteriormente permanecen constantes. En tal sentido, Vesic ha propuesto determinar la capacidad de carga de la siguiente manera:

Dado que  $c=0$ , se tiene la siguiente ecuación:

$$Q_{up} = A_p \sigma'_{vb} N_q + \int_0^L P \sigma'_{vb} k_s \tan \phi'_a dz$$

$$Q_u = A_p q'_i N_q^* \leq A_p 50 N_q^* \tan \phi$$

**Figura 12: Capacidad de carga para pilotes en suelos granulares**



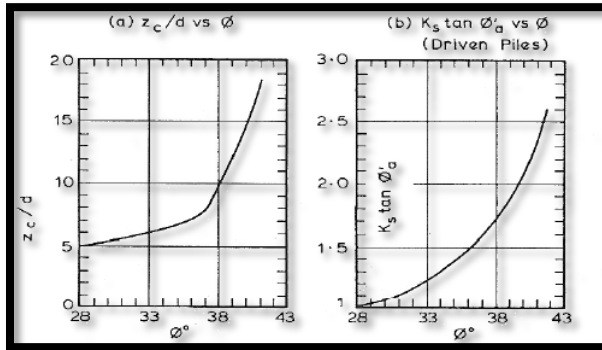
*Fuente: Del Toro 2011*

En la cual hay que determinar el valor de  $N_q$  y el valor  $k_s \tan \phi'_a$ , el valor de  $N_q$  se determina en la figura 7 pero aplicando las siguientes correcciones a los valores del ángulo de fricción interna del suelo:

$$\phi = \phi_1 - 3^\circ \text{ Para pilotes perforados}$$

$k_s \tan \phi'_a$  Se determina en la figura 11 (b), usando el ángulo de fricción corregido

**Figura 13: Determinación del valor de  $k_s \tan \phi'_a$**



Fuente: *Pile Foundation Analysis and Design, Poulos Davis*

## ASENTAMIENTOS

$$S = S_a + S_{punta} + S_{fricción}$$

Dónde:

El desplazamiento elástico:

$$S_a = Q_{punta} + \frac{2}{3} S_f \frac{L}{A * E_c}$$

El valor  $Q_{punta}$  lo podemos encontrar de acuerdo a la siguiente tabla donde  $Kfs$  es igual a la relación del módulo de elasticidad del concreto y el suelo

$$Kfs = \frac{E_{concreto}}{E_{suelo}}$$

**Tabla 1: Factor de Rigidez**

L/D	Kfs	Qpunta/P
2	100	0.2
	1000	0.25
	10000	0.3
5	100	0.15

L/D	Kfs	Qpunta/P
	1000	0.17
	10000	0.18
<b>10</b>	100	0.009
	1000	0.095
	10000	0.1
<b>25</b>	100	0.03
	1000	0.04
	10000	0.05
<b>50</b>	100	0.01
	1000	0.02
	10000	0.03

Fuente: *Pile Design and Construction Rules of Thumb*, Ruwan Rajapakse, CCM,  
CCE, PE

$$S_f = P - Q_{punta}$$

Desplazamiento por punta:

$$S_{punta} = C_t * \frac{Q_{punta}}{D * Q_{ult}}$$

El valor de  $C_t$  lo encontramos en la siguiente clasificación

**Tabla 2: Consistencia de suelo Vs  $C_t$**

Tipo de suelo	$C_t$ (por pilote)
<b>Arena</b>	0.09-0.18
<b>Arcilla</b>	0.03-0.06
<b>Limo</b>	0.09-.12

Fuente: *Pile Design and Construction Rules of Thumb*, Ruwan Rajapakse, CCM,  
CCE, PE

Desplazamiento por fricción:

$$S_{friccion} = C_s * \frac{S_f}{L * Q_{ult}}$$

Donde  $C_s = 0.93 + 0.16 \frac{L}{D}^{1.2} * C_t$

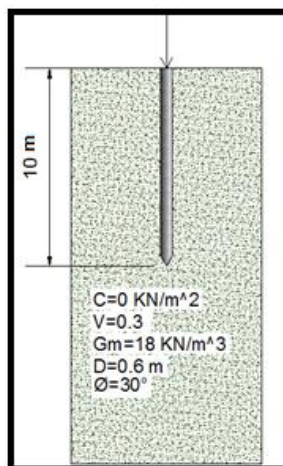
## 2.5. ANALISIS DE ESFUERZOS Y DESPLAZAMIENTOS ENTRE EL SUELO Y EL PILOTE

CASO 1: SUELOS GRANULARES

### EMPLEANDO METODOLOGIA CONVENCIONAL

Un pilote de concreto de 0,6m de diámetro y 10 m de longitud es pre-excavado en un estrato de suelo con arena que presenta las siguientes características;  $\gamma_m=18 \frac{KN}{m^3}$ , con ángulo de fricción de  $30^\circ$  y una coeficiente de poisson de 0,35.

**Figura 14: Esquema de pilote cargado verticalmente en suelo granular**



Fuente: Registro propio

Calcular los esfuerzos de falla y los desplazamientos presentes entre el suelo-pilote.

Calculo de la carga última mediante

$$Q_{up} = A_p \sigma'_{vb} N_q + \int_0^L \overline{\sigma'_{vb}} k_s \tan \phi'_a dz$$

Realizamos la Corrección del ángulo de fricción empleando la siguiente ecuación para pilotes pre-excavados:

$$\phi = \phi_1 - 3^\circ = 30^\circ - 3^\circ = 27$$

Mediante la figura 7 encontramos que el valor de  $N_q$  corresponde a 20. También de la figura 11(b) encontramos que  $k_s \tan \phi'_a = 1$  aproximadamente.

El esfuerzo vertical efectivo en la punta  $\sigma'_{vb}$  es el esfuerzo medido en toda la longitud del pilote como se muestra a continuación

$$\sigma'_{vb} = \gamma_m * L = 18 * 10 = 180 \frac{KN}{m^3}$$

El esfuerzo vertical efectivo medio en la longitud es  $\overline{\sigma'_v} = (\gamma_m * L/2) = 18 * 5 = 90 \frac{KN}{m^3}$

El área proyectada y el perímetro del pilote son:

$$A_p = \pi r^2 = \pi * 0.3^2 \approx 0.283 m^2 \quad Y \quad P_p = 2\pi r = 2\pi * 0.3 \approx 1.885 m$$

Para hallar el valor del  $Z_c$ , que es la profundidad hasta donde los esfuerzos del suelo llegan a ser constantes aproximadamente, entramos a la figura 11(a) de ahí

encontramos que la relación entre el Zcritico y el diámetro es cercana a 5, despejando encontramos que Zcrit=3.9 m

La carga por punta es la primera parte de la ecuación indicada anteriormente y es:

$$Q_u = A_p \sigma'_{vb} N_q = 0.283 * 180 * 20 = 1018.8$$

Pero debe cumplir la siguiente igualdad:

$$Q_u = A_p \sigma'_{vb} N_q \leq A_p 50 N_q \tan \phi$$

$$Q_u = 1018.8 \leq 0.283 * 50 * 20 * \tan 27 = 144.196$$

Entonces tomamos la carga de punta como  $Q_u = 144.196 \text{ KN}$

La carga última del suelo es:

$$Q_u = 144.196 + \int_0^{3.9} 1.88 * 18 * \frac{3.9}{2} * 1 * dz + \int_{3.9}^{10} 1.88 * 18 * 3.9 * 1 * dz$$

$$Q_u = 1206.599 \text{ KN}$$

## CALCULO DEL ASENTAMIENTO

$$S = S_a + S_{punta} + S_{fricción}$$

El desplazamiento elástico es:

$$S_a = \frac{Q_{punta}}{A} + \frac{2}{3} S_f \frac{L}{A * E_c}$$

Asumimos el módulo de elasticidad del concreto E concreto como 200000 MPa, y el del suelo como 15000 MPa para obtener Kfs=13.33

En la tabla 1, encontramos el valor de  $\frac{Q_{punta}}{P} = 0.09$

$$Q_{punta} = 0.09 * 1206.599 = 108.594 \text{ KN}$$

Ahora  $S_f = P - Q_{punta} = 1206.599 - 108.594 = 1098.005 \text{ KN}$

$$S_a = 108.594 + \frac{2}{3} 1098.005 \frac{10}{0.283 * 2E + 09} = 1.485E - 05 \text{ m}$$

Desplazamiento por punta:

$$S_{punta} = C_t * \frac{Q_{punta}}{D * Q_{ult}}$$

El intervalo para de  $C_t$  lo encontramos en la tabla 2,  $C_t=0.14$

$$S_{punta} = 0.14 * \frac{108.594}{0.6 * 1206.599} = 0.021 \text{ m}$$

Desplazamiento por fricción:

$$S_{friccion} = C_s * \frac{S_f}{L * Q_{ult}}$$

Donde

$$C_s = 0.93 + 0.16 \frac{L}{D}^{\frac{1}{2}} * C_t = C_s = 0.93 + 0.16 \frac{10}{.6}^{\frac{1}{2}} * 0.14 = 0.222$$

$$S_{friccion} = 0.222 * \frac{1098.005}{10 * 1206.599} = 0.02 \text{ m}$$

Encontrando de esta forma el asentamiento total:

$$S = 1.485E - 05 + 0.021 + 0.02 \approx 0.041 \text{ m} \approx \mathbf{4.1 \text{ cm}}$$

### **EMPLEANDO METODOLOGIA NUMERICA (PLAXIS)**

En PLAXIS se modelo esta situación de 3 maneras posibles, la primera utilizando el material del elemento estructural de tipo elasto-plastico, en el segundo es el material de tipo elástico , y para cada uno de ellos se evaluó con y sin interface ,

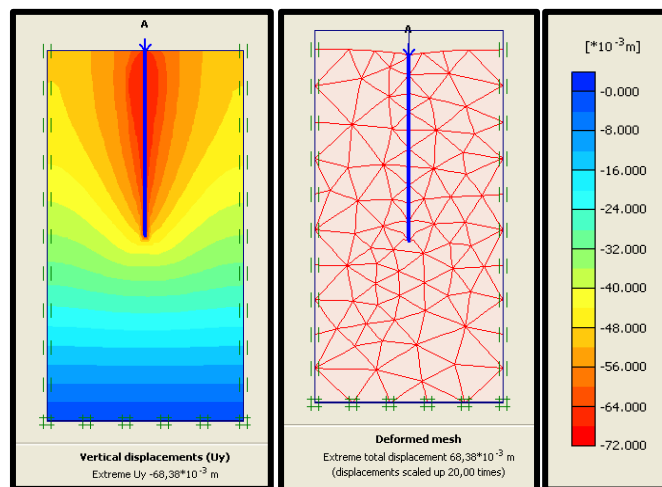
para poder analizar cuál de estos se aproxima más a los resultados teóricos calculados anteriormente.

A continuación mostraremos pantallazos de los resultados mostrados en el software.

Observamos según la información arrojada por el software Plaxis que igualmente se presenta una falla estructural cuando el pilote es sometido a una carga vertical de 1206.599 *KN* como se demostró aplicando el método convencional.

- **Modelo elástico sin interface**

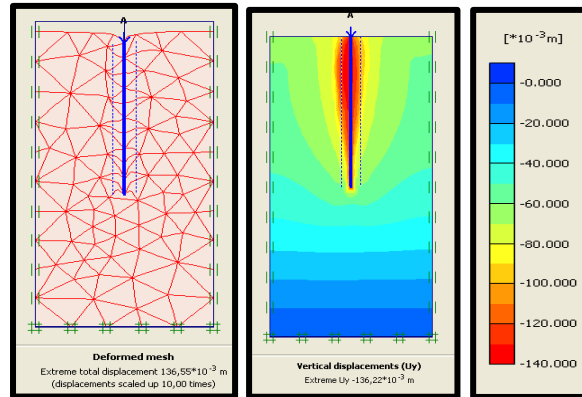
**Figura 15. Diagrama de desplazamientos verticales plaxis sin interfaz (suelos granulares)**



El programa muestra la falla del pilote al aplicarle una carga de 1000 *KN*, y un desplazamiento para esta de  $68,38 \cdot 10^{-3} m$  aproximadamente 6,838 *cm* y en método conveccional para la carga de falla obtuvimos un desplazamiento de 4[*cm*] aproximadamente.

- **Modelo elástico con interfaz**

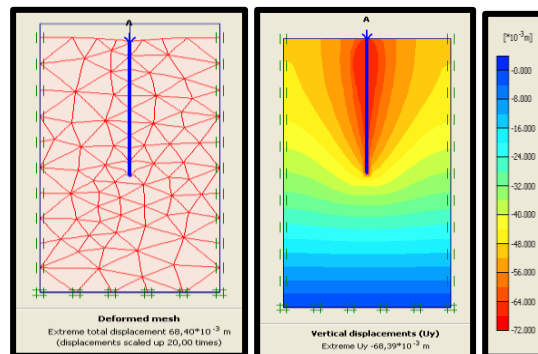
**Figura 16. Diagrama de desplazamientos verticales plaxis con interfaz (suelos granulares)**



En este caso el software muestra dos cargas de falla una en 750 y otra aplicándole la carga ultima calcula de forma convencional, los desplazamientos mostrados con esta última son  $20,592 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  aproximadamente  $2,06 \text{ cm}$

- **Modelo elásto-plástico sin interfaz**

**Figura 17. Diagrama de desplazamientos verticales plaxis elasto-plástico sin interfaz (suelos granulares)**



Los resultados muestra una falla con una carga aplicada de 1000 KN, y un desplazamiento de  $68,39 \cdot 10^{-3} m$  aproximadamente  $6,84 \text{ cm}$

Como podemos observar la variaciones entre las diferentes formas de modelar el ejercicio en PLAXIS, nos muestra mucha cercanía entre los datos de desplazamiento obtenidos, pero en la obtención de la carga ultima es diferente ya que la interface suministra mayor rigidez al pilote para soportar más carga, por ellos adoptamos para nuestros próximos modelos un pilote sin interface y con un material elasto-plastico.

### **3. COMPORTAMIENTO DE PILOTES CARGADOS LATERALMENTE**

En el diseño de cualquier tipo de cimentación así como en el cálculo de los pilotes que son cargados por una fuerza horizontal se debe garantizar que el conjunto de suelo-pilote va a hacer capaz de resistir las cargas a las que es sometida la cimentación. Igualmente se debe mantener los desplazamientos dentro de límites razonables garantizando de esta forma una excelente funcionalidad de la estructura en conjunto.

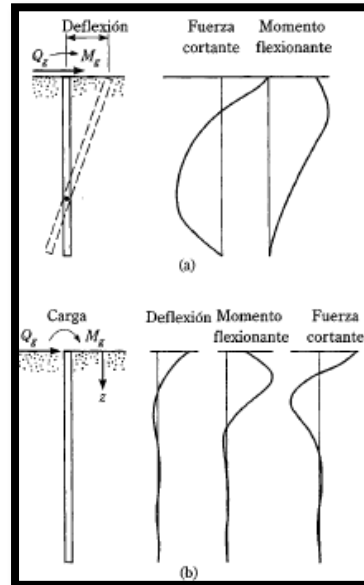
El grado de distribución de la reacción del suelo depende de:

- a) La rigidez del pilote
- b) La rigidez del suelo
- c) La restricción en los extremos del pilote

De forma general se han clasificado el estudio de pilotes cargados lateralmente en dos tipos principales:

- Pilotes cortos o rígidos
- Pilotes largos o elásticos

**Figura 18: Variación de la deflexión, momento y fuerza cortante en pilotes a) cortos o rígidos b) largos o elásticos.**



*Fuente Principio de ingeniería de cimentaciones (BRAJA.DAS)*

### **3.1. ANALISIS POR CARGA ÚLTIMA EMPLEANDO EL METODO DE BROMS (1965)**

El método de Broms (1965) analiza por partes separadas el comportamiento ante la presencia de carga lateral de suelos arcillosos y suelos granulares considerando distintas condiciones de rigidez en los elementos y analizado los efectos de las restricciones introducidas en la parte superior de la fundaciones.

A partir de la identificación de los modos de falla, Broms propone un método sencillo basado en los trabajos matemáticos en el campo de la teoría de la elasticidad realizados por Vesic, Newmark entre otros. Para la identificación de los modos de falla se introduce el concepto de elemento corto y largo o elástico, es claro que en un elemento corto la rigidez es tal que la falla se producirá por

desplazamientos excesivo debidos a la plastificación del suelo. Por el contrario Por el contrario un elemento largo relativamente flexible sufrirá deformaciones que causarán la formación de articulaciones plásticas en algunas secciones del elemento y eventualmente su rotura.

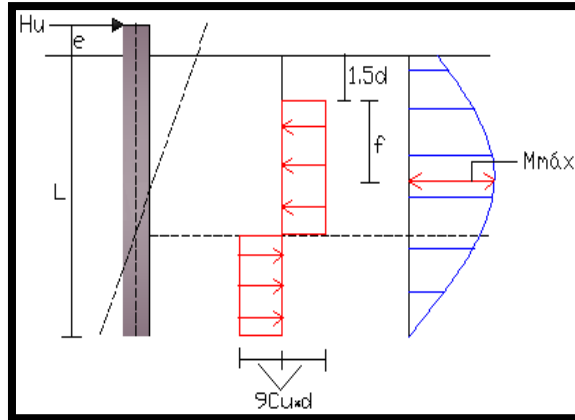
Para la definición de los modos de falla, Broms establece criterios de falla independientes para el suelo y para la estructura. Para el suelo asume que la resistencia última del suelo ante carga lateral se alcanza cuando el suelo se ha plastificado totalmente en la zona de contacto con el elemento de forma que no es capaz de tomar carga adicional. La resistencia última del elemento se alcanzará cuando a lo largo del elemento se forme tantas rótulas plásticas como sean necesarias para transformarlo en un mecanismo. La resistencia última del sistema suelo-estructura será la carga para la cual alguno de los estados de falla anteriores se alcanza primero.

### **3.2. PILOTES EN SUELOS COHESIVOS**

- ***Pilote corto de cabeza libre (  $L/D < 10$  )***

Broms asume que cuando el mecanismo de falla corresponde a elementos cortos la falla se produce cuando se alcanza la plastificación total del suelo circundante. La presión última a la cual el suelo se plastifica no es constante para cualquier profundidad. Broms adopta el valor de  $9S_u$  y propone una distribución equivalente

**Figura 19: Pilote corto en suelo cohesivo cargado lateralmente**



*Fuente: Pile Foundation Analysis and Design, Poulos Davis*

Broms asume que cuando el mecanismo de falla corresponde a elementos cortos la falla se produce cuando se alcanza la plastificación total del suelo circundante. La presión última a la cual el suelo se plastifica no es constante para cualquier profundidad. Broms adopta el valor de  $9S_u$  y propone una distribución equivalente.

$$f = \frac{Hu}{9 * C_u * d}$$

$$M_{max} = Hu(e + 1,5d + 0,5f)$$

*Dónde:*

*Hu: capacidad de carga*

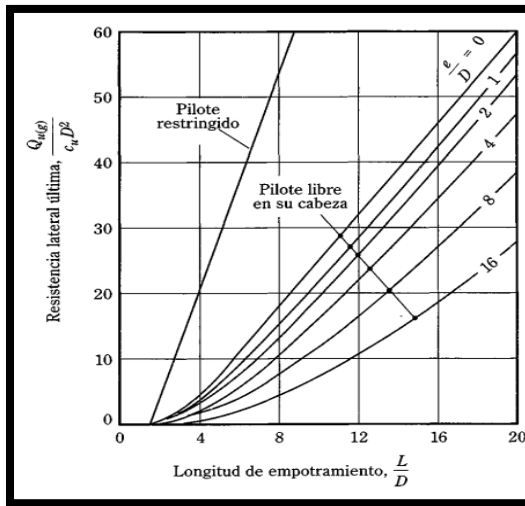
*d: diametro del pilote*

*e: excentricidad*

*f: distancia al momento maximo*

Considerando el equilibrio, Broms determina la carga última para los casos de elemento corto restringido o libre, que se presenta en forma gráfica en la figura siguiente:

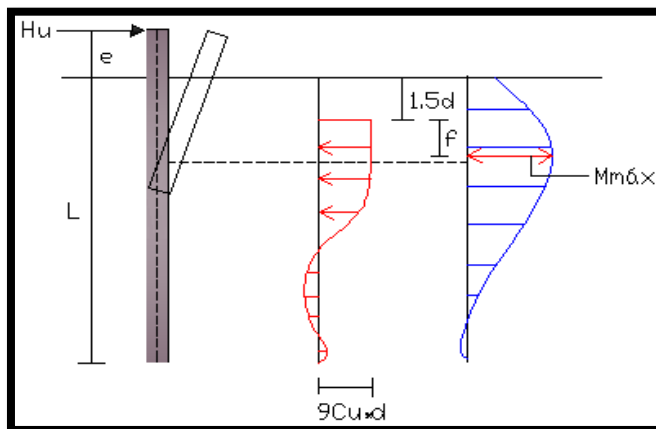
**Figura 20: Resistencia lateral última para pilotes cortos en suelos cohesivos**



Fuente *Principio de ingeniería de cimentaciones (BRAJA.DAS)*

- **Pilote largo de cabeza libre (  $L/D > 10$  )**

**Figura 21: Pilote largo en suelo cohesivo cargado lateralmente**



Fuente: *Pile Foundation Analysis and Design, Poulos Davis*

$$f = \frac{Hu}{9 * Cu * d}$$

$$M_{max} = Hu(e + 1,5d + 0,5f)$$

Dónde:

*Hu*: capacidad de carga

*d*: diametro del pilote

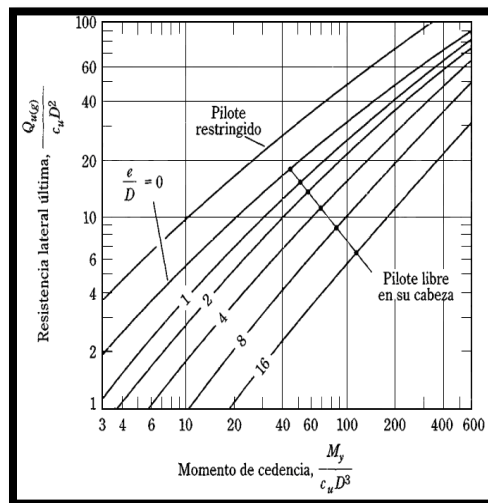
*C<sub>u</sub>*: cohesion no drenada

*e*: excentricidad

*f*: distancia al momento maximo

Cuando los elementos son largos, Broms asume que, tanto las articulaciones plásticas como la plastificación del suelo ocurren de forma simultánea, con lo cual es posible determinar la carga última con la siguiente gráfica:

**Figura 22: Resistencia lateral ultima para pilotes largos en suelos cohesivos**



Fuente Principio de ingeniería de cimentaciones (BRAJA.DAS)

El valor de  $M_y$  que observamos en la gráfica, corresponde al momento de fluencia para el pilote, el cual lo podemos determinar de la siguiente manera:

$$M_y = SF_Y$$

Dónde:

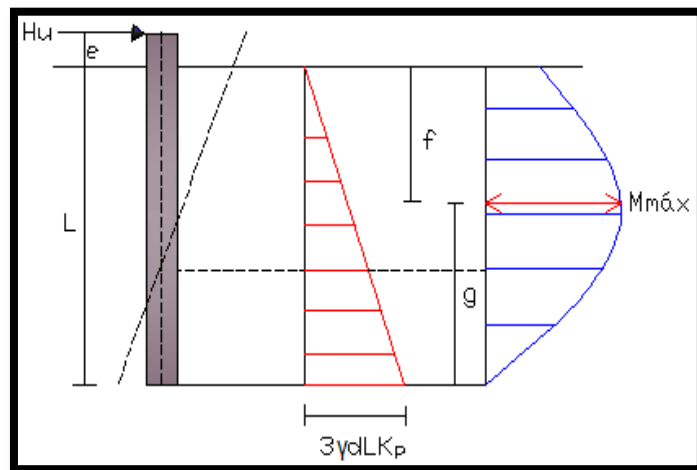
$S$  : modulo de seccion de la seccion del pilote

$F_Y$ : esfuerzo de fluencia del material del pilote

### 3.3. PILOTES EN SUELO GRANULARES

- Pilotes cortos de cabeza libre

Figura 23: Pilote corto en suelo granular cargado lateralmente



Fuente: *Pile Foundation Analysis and Design*, Poulos Davis

$$Hu \frac{0,5\gamma d L^3 K_p}{e + L}$$

$$f = 0.82 \frac{Hu}{dK_p\gamma}$$

$$M_{Max} = Hu(e + \frac{2}{3}f)$$

Dónde:

$Hu$ : capacidad de carga

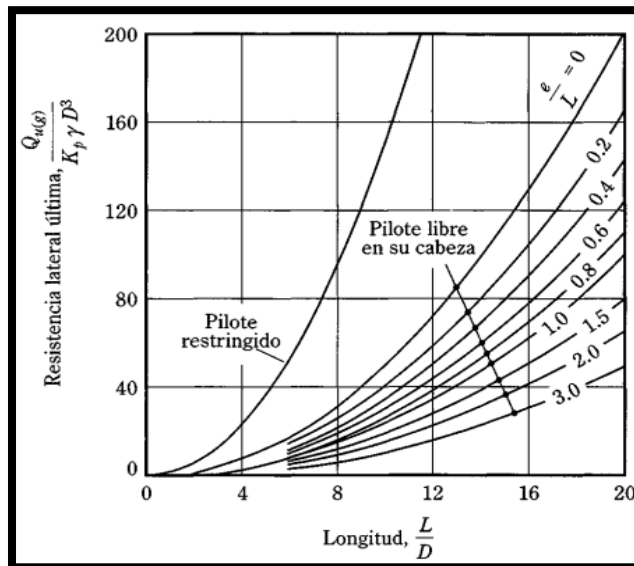
$d$ : diametro del pilote

$L$ : longitud del pilote

$K_p$ : coeficiente de presion pasiva de Rankine =  $\tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$

Determinamos la carga última con la siguiente gráfica:

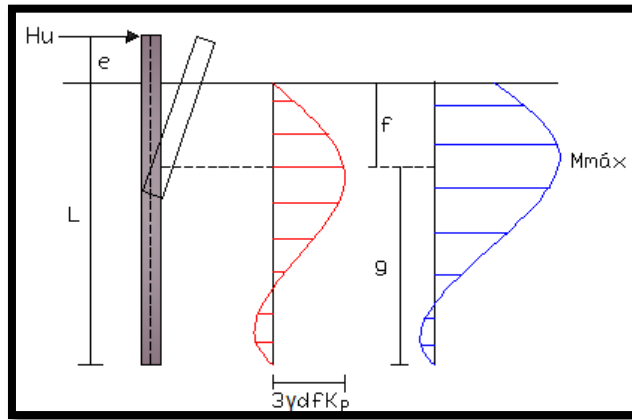
**Figura 24: Resistencia lateral última para pilotes cortos en suelos granulares**



Fuente Principio de ingeniería de cimentaciones (BRAJA.DAS)

- Pilotes largos de cabeza libre

Figura 25: Pilote largo en suelo granular cargado lateralmente



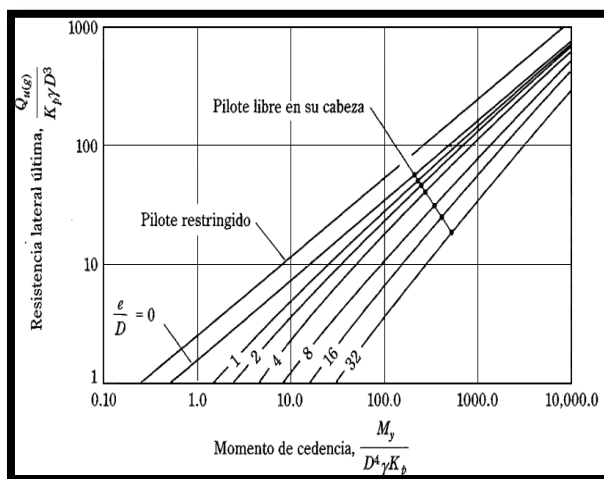
Fuente: *Pile Foundation Analysis and Design*, Poulos Davis

$$Hu = \frac{3}{2} \gamma d K_p f^2$$

$$M_{max} = M_r = Hu \left( e + \frac{2}{3} f \right)$$

Determinamos la carga última con la siguiente gráfica:

Figura 26: Resistencia lateral última para pilotes largos en suelos granulares



Fuente *Principio de ingeniería de cimentaciones* (BRAJA.DAS)

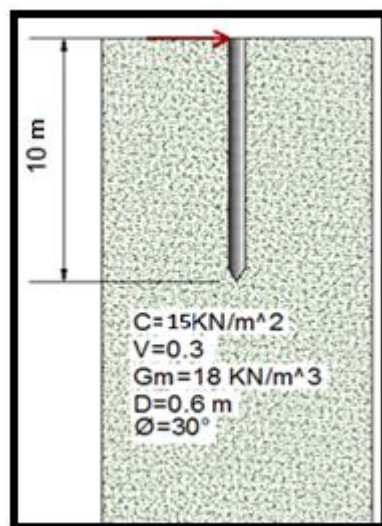
La técnica empleada por Broms suele ser algo simplificada pero se visualizan las tendencias y los comportamientos generales que suelen ser de gran utilidad en las etapas de diseño preliminar.

### 3.4. ANALISIS DE ESFUERZOS Y DESPLAZAMIENTOS ENTRE EL SUELO Y EL PILOTE

#### CASO 1: SUELO COHESIVO

En este caso 1 donde se presenta el conjunto de un suelo granular con las características indicadas en el esquema anterior interactuando con un pilote cargado lateralmente, queremos garantizar que este conjunto suelo-pilote es capaz de resistir las cargas a las que son sometidas.

**Figura 27: Esquema de pilote cargado lateralmente en suelo cohesivo**



*Fuente: Registro propia*

Cargaremos los pilotes lateralmente con cargas de 1KN, 10KN, 100KN Y 1000 KN y observaremos la capacidad de resistencia de cada pilote así como el asentamiento que se presente respectivamente, logrando comparar entre métodos convencionales y metodologías numérica (Plaxis).

### **Resistencia lateral ultima Qu**

$$M_Y = Fy * \frac{I_{Circular}}{d^2} = 42,4 * 10^6 N.mm$$

En la siguiente fórmula reemplazamos los valores, obteniendo:

$$\frac{M_Y}{C_u * D^3} = 13,2$$

Con el anterior valor entramos a la figura 17 y de ahí encontramos el valor de Qu:

$$Q_{ULT} = 378 KN$$

### **EMPLEANDO METODOLOGIAS CONVENCIONALES**

- **Desplazamiento por carga lateral= 1KN**

$$S = S_a + S_{punta} + S_{fricción}$$

El desplazamiento elástico:

$$S_a = Q_{punta} + \frac{2}{3} S_f \frac{L}{A * E_c}$$

Asumimos el módulo de elasticidad del concreto E concreto como 21538,10MPa, y el del suelo granular como 7,5 Mpa para obtener Kfs=2871,74

En la tabla 1, encontramos el valor de  $\frac{Q_{punta}}{P} = 0.095$

$$Q_{punta} = 0.095 * 1KN = 0,095 KN = 95N$$

Ahora

$$S_f = P - Q_{punta} = 1KN - 0,095 = 0,905 KN = 905N$$

$$S_a = 95 N + \frac{2}{3} 905N \frac{10000mm}{280000mm^2 * 21538,10 Mpa} = 0,00116 mm$$

Desplazamiento por punta:

$$S_{punta} = C_t * \frac{Q_{punta}}{D * Q_{ult}}$$

El intervalo para de  $C_t$  lo encontramos en la tabla 2,  $C_t=0.045$

$$S_{punta} = 0.045 * \frac{95}{0.6 * 37800} = 0.000188 m = 0,188 mm$$

Desplazamiento por fricción:

$$S_{friccion} = C_s * \frac{S_f}{L * Q_{ult}}$$

Donde

$$C_s = 0.93 + 0.16 \frac{L}{D}^{\frac{1}{2}} * C_t = C_s = 0.93 + 0.16 \frac{10}{.6}^{\frac{1}{2}} * 0.045 = 0.07124$$

$$S_{friccion} = 0.07124 * \frac{905}{10 * 37800} = 0.00017m = 0,170mm$$

Encontrando de esta forma el asentamiento total:

$$S = 0,00116mm + 0,188mm + 0,170mm \approx 0,359mm \approx \mathbf{0,0359 cm}$$

- **Desplazamiento por carga lateral= 10KN**

$$S = S_a + S_{punta} + S_{friccion}$$

El desplazamiento elástico:

$$S_a = Q_{punta} + \frac{2}{3} S_f \frac{L}{A * E_c}$$

$$Kfs = 2871,74$$

En la tabla 1, encontramos el valor de  $\frac{Q_{punta}}{P} = 0.095$

$$Q_{punta} = 0.095 * 10KN = 0,95 KN = 950N$$

Ahora  $S_f = P - Q_{punta} = 10KN - 0,95 = 9,05 KN = 9050N$

$$S_a = 950 N + \frac{2}{3} 9050N \frac{10000mm}{280000mm^2 * 21538,10 Mpa} = 0,0116 mm$$

Desplazamiento por punta:

$$S_{punta} = C_t * \frac{Q_{punta}}{D * Q_{ult}}$$

El intervalo para de  $C_t$  lo encontramos en la tabla 2,  $C_t=0.045$

$$S_{punta} = 0.045 * \frac{950}{0.6 * 37800} = 0.042 m = 1,88 mm$$

Desplazamiento por fricción:

$$S_{friccion} = C_s * \frac{S_f}{L * Q_{ult}}$$

Donde

$$C_s = 0.93 + 0.16 \frac{L}{D}^{\frac{1}{2}} * C_t = C_s = 0.93 + 0.16 \frac{10}{.6}^{\frac{1}{2}} * 0.045 = 0.07124$$

$$S_{friccion} = 0.07124 * \frac{9050}{10 * 37800} = 0.0017m = 1,7056mm$$

Encontrando de esta forma el asentamiento total:

$$S = 0,0116mm + 1,88mm + 1,7056mm \approx 3,60mm \approx \mathbf{0,36 cm}$$

- **Desplazamiento por carga lateral= 100KN**

$$S = S_a + S_{punta} + S_{fricción}$$

El desplazamiento elástico:

$$S_a = Q_{punta} + \frac{2}{3} S_f \frac{L}{A * Ec}$$

$$Kfs = 2871,74$$

En la tabla 1, encontramos el valor de  $\frac{Q_{punta}}{P} = 0.095$

$$Q_{punta} = 0.095 * 100KN = 9,5 KN = 9500N$$

Ahora  $S_f = P - Q_{punta} = 100KN - 9,5 = 90,5 KN = 90500N$

$$S_a = 9500 N + \frac{2}{3} 90500N \frac{10000mm}{280000mm^2 * 21538,10 Mpa} = 0,116 mm$$

Desplazamiento por punta:

$$S_{punta} = Ct * \frac{Q_{punta}}{D * Qult}$$

El intervalo para de Ct lo encontramos en la tabla 2, Ct=0.045

$$S_{punta} = 0.045 * \frac{9500}{0.6 * 37800} = 0.0188 m = 18,849 mm$$

Desplazamiento por fricción:

$$S_{fricción} = Cs * \frac{Sf}{L * Qult}$$

Donde

$$Cs = 0.93 + 0.16 \frac{L}{D}^{\frac{1}{2}} * Ct = Cs = 0.93 + 0.16 \frac{10}{.6}^{\frac{1}{2}} * 0.045 = 0.07124$$

$$S_{fricción} = 0.07124 * \frac{90500}{10 * 37800} = 0.0170m = 17,05mm$$

Encontrando de esta forma el asentamiento total:

$$S = 0,116\text{mm} + 18,849\text{mm} + 17,05\text{mm} \approx 36,02\text{mm} \approx \mathbf{3,60\text{ cm}}$$

- **Desplazamiento por carga lateral= 1000KN**

$$S = S_a + S_{punta} + S_{fricción}$$

El desplazamiento elástico:

$$S_a = Q_{punta} + \frac{2}{3} S_f \frac{L}{A * E_c}$$
$$K_{fs} = 2871,74$$

En la tabla 1, encontramos el valor de  $\frac{Q_{punta}}{P} = 0.095$

$$Q_{punta} = 0.095 * 1000\text{KN} = 95\text{ KN} = 95000\text{N}$$

Ahora  $S_f = P - Q_{punta} = 1000\text{KN} - 9,5 = 990,5\text{ KN} = 990500\text{N}$

$$S_a = 95000\text{ N} + \frac{2}{3} 990500\text{N} \frac{10000\text{mm}}{280000\text{mm}^2 * 21538,10\text{ Mpa}} = 1,252\text{ mm}$$

Desplazamiento por punta:

$$S_{punta} = C_t * \frac{Q_{punta}}{D * Q_{ult}}$$

El intervalo para de  $C_t$  lo encontramos en la tabla 2,  $C_t=0.045$

$$S_{punta} = 0.045 * \frac{95000}{0.6 * 37800} = 0.188\text{ m} = 188,49\text{ mm}$$

Desplazamiento por fricción:

$$S_{fricción} = C_s * \frac{S_f}{L * Q_{ult}}$$

Donde

$$C_s = 0.93 + 0.16 \frac{L}{D}^{\frac{1}{2}} * C_t = C_s = 0.93 + 0.16 \frac{10}{.6}^{\frac{1}{2}} * 0.045 = 0.07124$$

$$S_{friccion} = 0.07124 * \frac{990500}{10 * 37800} = 0.186m = 186,67mm$$

Encontrando de esta forma el asentamiento total:

$$S = 1,252mm + 188,49mm + 186,67mm \approx 376,412mm \approx \mathbf{37,64\ cm}$$

### **EMPLEANDO METODOLOGIA NUMERICA (PLAXIS)**

En el software Plaxis se realizó la simulación del suelo cohesivo y pilote cargado lateralmente, con las características respectivas mencionadas anteriormente.

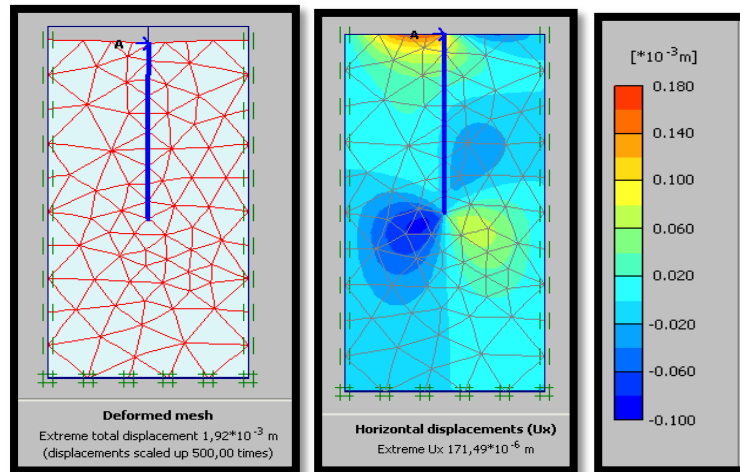
En la primera simulación realizamos el análisis del pilote sin carga lateral y a continuación se cargó el pilote con las cargas de 1KN, 10KN, 100KN Y 1000KN respectivamente. El programa nos muestra la información de falla de cada pilote y su asentamiento correspondiente.

Observamos que el pilote presenta falla estructural cuando está cargado lateralmente con una fuerza igual o superior a 1000 KN en un suelo Arcilloso. Inicialmente se asumió que el pilote entraba en la calificación de pilote largo según el Método de Broms estudiado anteriormente, donde nos revela que un elemento largo relativamente flexible sufrirá deformaciones que causarán la formación de articulaciones plásticas en algunas secciones del elemento y eventualmente su rotura.

A continuación mostraremos las deformaciones o asentamientos presentados por cada pilote cargado que fue analizado mediante el software.

- **Desplazamiento horizontal para carga lateral de 1KN**

**Figura 28. Diagrama de desplazamientos horizontales plaxis para carga lateral de 1 KN (Suelo Cohesivo)**

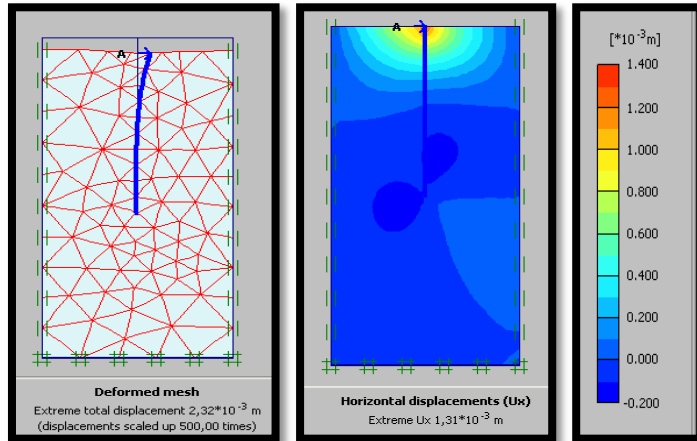


El esquema anterior es arrojado por el software donde nos indica gráficamente los valores de los desplazamientos que se presentaron con una carga de 1KN. El desplazamiento horizontal obtenido tiene un valor de  $0,18 * 10^{-3}m = 0,18 \text{ mm}$ .

- **Desplazamiento horizontal para carga lateral de =10KN**

El esquema anterior es arrojado por el software donde nos indica gráficamente los valores de los desplazamientos que se presentaron con una carga de 10KN. El desplazamiento horizontal obtenido tiene un valor de  $1,4 * 10^{-3}m = 1,4 \text{ mm}$ .

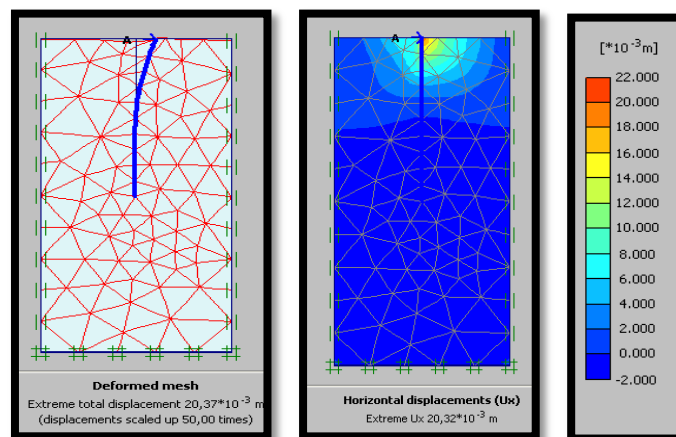
**Figura 29. Diagrama de desplazamientos horizontales plaxis para carga lateral de 10 KN(Suelo Cohesivo)**



- **Desplazamiento horizontal para carga lateral de =100KN**

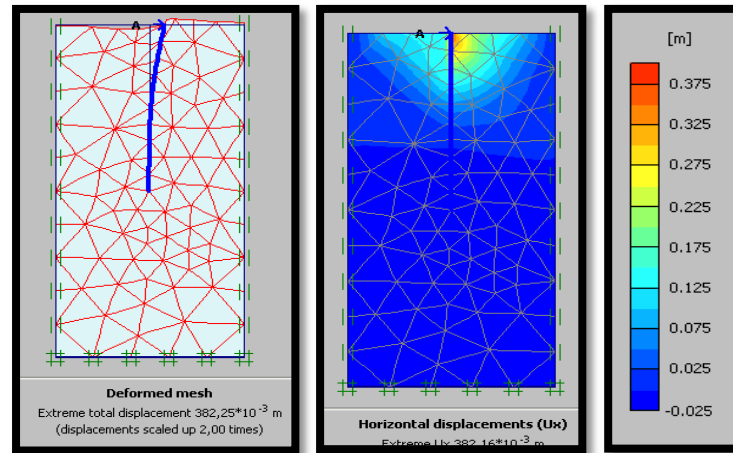
El esquema anterior es arrojado por el software donde nos indica gráficamente los valores de los desplazamientos que se presentaron con una carga de 10KN. El desplazamiento horizontal obtenido tiene un valor de  $22 \cdot [10^{-3}m] = 2,2 \text{ cm}$ .

**Figura 30. Diagrama de desplazamientos horizontales plaxis para carga lateral de 100 KN(Suelo Cohesivo)**



- Desplazamiento horizontal para carga lateral de =1000KN

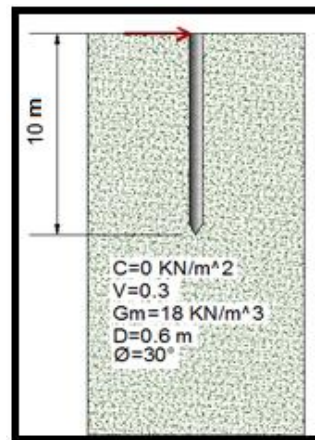
**Figura 31. Diagrama de desplazamientos horizontales plaxis para carga lateral de 1000 KN(Suelo Cohesivo)**



El esquema anterior es arrojado por el software donde nos indica gráficamente los valores de los desplazamientos que se presentaron con una carga de 10KN. El desplazamiento horizontal obtenido tiene un valor de  $0,375m = 375mm$ .

### CASO 2: SUELO GRANULAR

**Figura 32: Esquema de pilote cargado lateralmente en suelo granular**



*Fuente: Registro propio*

### **Resistencia lateral ultima Qu**

$$M_y = Fy * \frac{I_{Circular}}{d^2} = 42,4 * 10^6 N.mm$$

$$kp = \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$$

En la siguiente fórmula reemplazamos los valores, obteniendo:

$$\frac{M_y}{Kp * \gamma * D^4} = 5,25$$

Con el anterior valor entramos a la figura 21 y de ahí encontramos el valor de Qu:

$$Q_{ULT} = 575,7 KN$$

### **EMPLEANDO METODOLOGIAS CONVENCIONALES**

- **Desplazamiento horizontal para carga lateral de = 1KN**

$$S = S_a + S_{punta} + S_{fricción}$$

El desplazamiento elástico:

$$S_a = Q_{punta} + \frac{2}{3} S_f \frac{L}{A * Ec}$$

$$S_a = 0,00116 mm$$

Desplazamiento por punta:

$$S_{punta} = Ct * \frac{Q_{punta}}{D * Q_{ult}}$$

El intervalo para de Ct lo encontramos en la tabla 2, Ct=0.135

$$S_{punta} = 0,371 mm$$

Desplazamiento por fricción:

$$S_{friccion} = C_s * \frac{S_f}{L * Q_{ult}}$$

Donde

$$C_s = 0.153$$

$$S_{friccion} = 0,2405mm$$

Desplazamiento total =  $0,612mm \approx 0,0612 \text{ cm}$

- **Desplazamiento horizontal para carga lateral de 10KN**

$$S = S_a + S_{punta} + S_{friccion} = 0,0116 + 3,71 + 2,405 = 6,12mm \approx 0,612 \text{ cm}$$

- **Desplazamiento horizontal para carga lateral de 100KN**

$$S = S_a + S_{punta} + S_{friccion} = 0,116 + 37,12 + 24,05 = 61,288mm \approx 6,12 \text{ cm}$$

- **Desplazamiento horizontal para carga lateral de 1000KN**

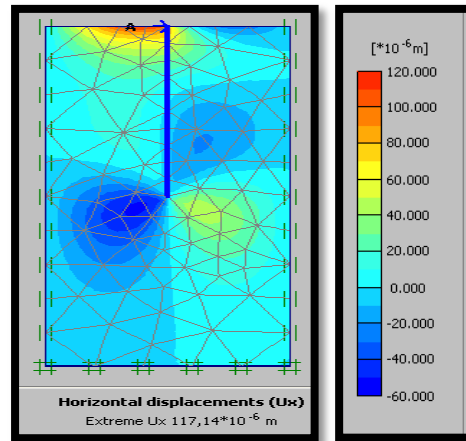
$$S = S_a + S_{punta} + S_{friccion} = 1,252 + 371,287 + 263,23 = 635,769 \approx 63,57 \text{ cm}$$

### **EMPLEANDO METODOLOGIA NUMERICA (PLAXIS)**

Observamos que el pilote presenta falla estructural cuando está cargado lateralmente con una fuerza igual o superior a 1000 KN en un suelo Granular.

- **Desplazamiento horizontal para carga lateral de 1KN**

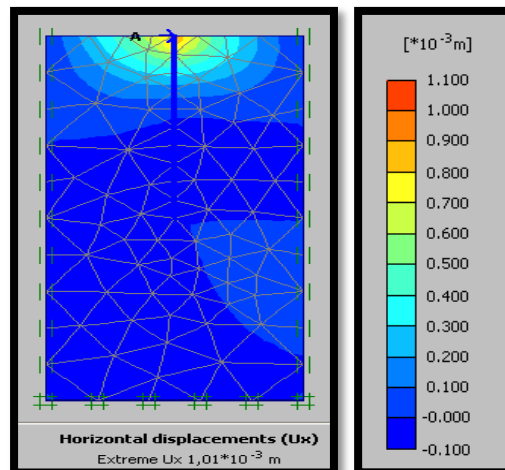
**Figura 33. Diagrama de desplazamientos horizontales plaxis para carga lateral de 1KN(Suelo granular)**



El desplazamiento horizontal obtenido tiene un valor de 0,12 mm.

- **Desplazamiento horizontal para carga lateral de 10KN**

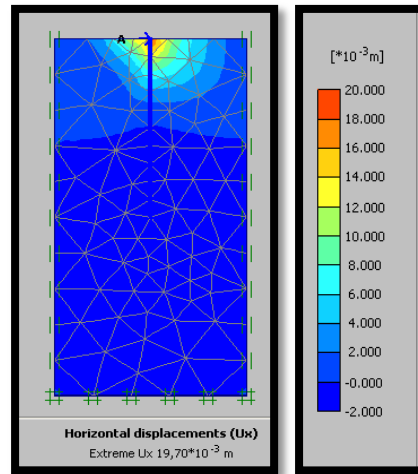
**Figura 34. Diagrama de desplazamientos horizontales plaxis para carga lateral de 10KN(Suelo granular)**



El desplazamiento horizontal obtenido tiene un valor de 1,1 mm

- **Desplazamiento horizontal para carga lateral de 100KN**

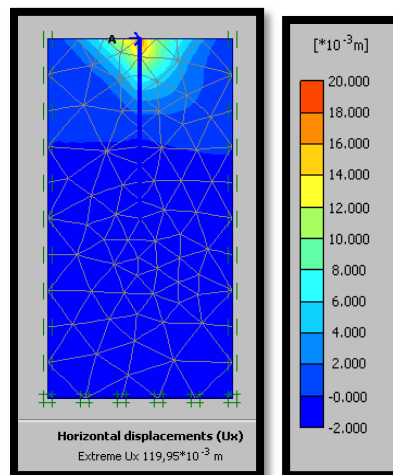
**Figura 35. Diagrama de desplazamientos horizontales plaxis para carga lateral de 100 KN(Suelo granular)**



El desplazamiento horizontal obtenido tiene un valor de 20mm

- **Desplazamiento horizontal para carga lateral de 1000KN**

**Figura 36. Diagrama de desplazamientos horizontales plaxis para carga lateral de 1000 KN(Suelo granular)**



El desplazamiento horizontal obtenido tiene un valor de 130 mm

## 4. CAPACIDAD ÚLTIMA VERTICALY ASENTAMIENTOS DE UN GRUPO DE PILOTES

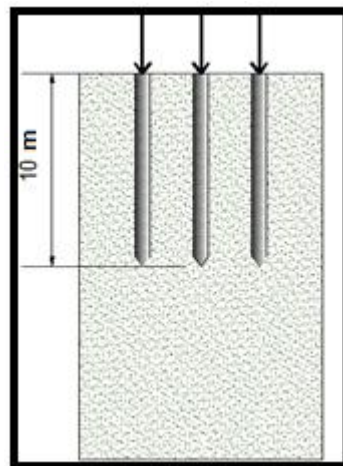
CASO 1: SUELO GRANULAR

### EMPLEANDO METODOLOGIAS CONVENCIONALES

#### **CAPACIDAD ÚLTIMA:**

Inicialmente encontramos la eficiencia del grupo de pilotes

**Figura 37: Esquema de grupos de pilote cargado verticalmente en suelo granular**



*Fuente: Registro propio*

$$E_g = \frac{2 * n + m - 2 * s + 4 * D}{p * n * m}$$
$$E_g = \frac{2 * 3 + 1 - 2 * 1,8 + 4 * 0,6}{1,88 * 3 * 1} = 1,7$$

Como  $E_g \geq 1$  entonces la capacidad de carga del grupo de pilotes es:

$$Q_{g u} = Q_u$$

Anteriormente habíamos encontrado la capacidad de carga del pilote en un suelo granular

$$Q_u \text{ suelo granular} = 1206,599 \text{ KN}$$

Entonces la capacidad de grupo de pilotes en suelo granular es:

$$Q_{g u} = 3 * 1206,599 \text{ KN} = 3619,797 \text{ KN}$$

- **ASENTAMIENTOS:**

Asentamiento elástico del grupo de pilote es:

$$S_{g(e)} = \frac{Bg}{D} * S$$

Donde

*Bg*: ancho de la sección del grupo de pilotes

*D*: Dimetro de cada pilote en el grupo

*s*: asentamiento elastico de cada pilote ( hallado anteriormente)

$$S_{g e} = \frac{4,2}{0,6} * 1,485 * 10^{-5}$$

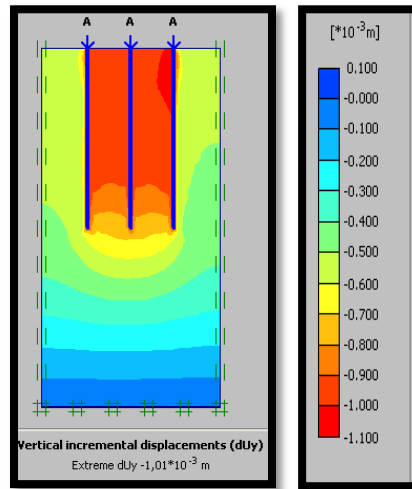
$$S_{g e} = 3,92 * 10^{-5} m$$

### **EMPLEANDO METODOLOGIA NUMERICA (PLAXIS)**

Obtenemos en la simulación con el software el asentamiento o desplazamiento del grupo de pilotes en un suelo granular

Figura 38. Diagrama de desplazamientos verticales en grupo de pilotes

Plaxis ( suelo granular)

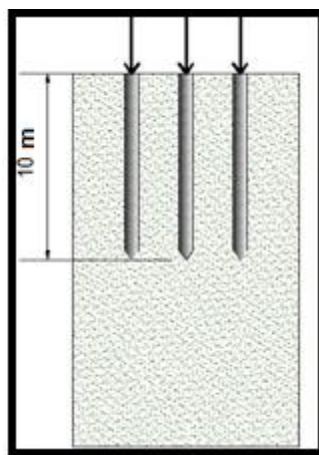


CASO 2: SUELO COHESIVO EN CONDICIONES DRENADAS

### EMPLEANDO METODOLOGIAS CONVENCIONALES

**CAPACIDAD ÚLTIMA:**

Figura 39: Esquema de grupo de pilotes cargado verticalmente en suelo arcilloso en condiciones drenadas



Fuente: Registro propio

Inicialmente encontramos la eficiencia del grupo de pilotes

$$E_g = \frac{2 * n + m - 2 * s + 4 * D}{p * n * m}$$

$$E_g = \frac{2 * 3 + 1 - 2 * 1,8 + 4 * 0,6}{1,88 * 3 * 1} = 1,7$$

Como  $E_g \geq 1$  entonces la capacidad de carga del grupo de pilotes es:

$$Q_{g u} = Q_u$$

Anteriormente habíamos encontrado la capacidad de carga del pilote en un suelo cohesivo drenado

$$Q_u \text{ suelo cohesivo} = 2171,309 \text{ KN}$$

Entonces la capacidad de grupo de pilotes en suelo granular es:

$$Q_{g u} = 3 * 2171,309 \text{ KN} = 6513,927 \text{ KN}$$

### **ASENTAMIENTOS:**

Asentamiento elástico del grupo de pilote es:

$$S_{g(e)} = \frac{B_g}{D} * S$$

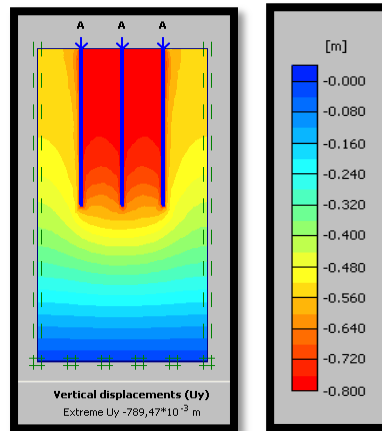
$$S_{g e} = \frac{4,2}{0,6} * 2.673 * 10^{-5}$$

$$S_{g e} = 7,07 * 10^{-5} m$$

### **EMPLEANDO METODOLOGIA NUMERICA (PLAXIS)**

Obtenemos en la simulación con el software el asentamiento o desplazamiento del grupo de pilotes en un suelo cohesivo drenado.

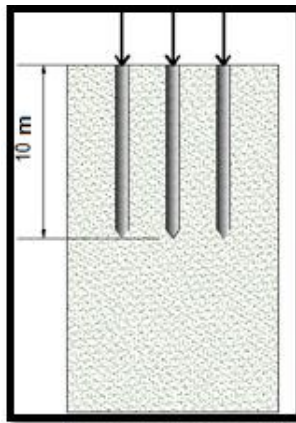
**Figura 40. Diagrama de desplazamientos verticales en grupo de pilotes Plaxis ( suelo cohesivo en condiciones drenadas)**



*CASO 3: SUELO COHESIVO EN CONDICIONES NO DRENADAS*

### **EMPLEANDO METODOLOGIAS CONVENCIONALES**

**Figura 41: Esquema de grupos de pilotes cargado verticalmente en suelo cohesivo en condiciones no drenadas**



*Fuente: Registro Propio*

#### 4.1. CAPACIDAD ÚLTIMA DE CARGA VERTICAL

Inicialmente encontramos la eficiencia del grupo de pilotes

$$E_g = \frac{2 * n + m - 2 * s + 4 * D}{p * n * m}$$

$$E_g = \frac{2 * 3 + 1 - 2 * 1,8 + 4 * 0,6}{1,88 * 3 * 1} = 1,7$$

Como  $E_g \geq 1$  entonces la capacidad de carga del grupo de pilotes es:

$$Q_{g u} = Q_u$$

Anteriormente habíamos encontrado la capacidad de carga del pilote en un suelo cohesivo no drenado

$$Q_u \text{ suelo cohesivo no drenado} = 339,805 \text{ KN}$$

Entonces la capacidad de grupo de pilotes en suelo granular es:

$$Q_{g u} = 3 * 339,805 \text{ KN} = 1019,415 \text{ KN}$$

#### **ASENTAMIENTOS:**

Asentamiento elástico del grupo de pilote es:

$$S_{g(e)} = \frac{B_g}{D} * S$$

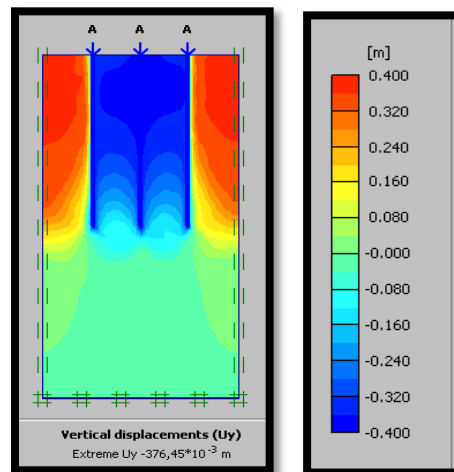
$$S_{g e} = \frac{4,2}{0,6} * 4,183 * 10^{-6}$$

$$S_{g e} = 1,11 * 10^{-5} m$$

## EMPLEANDO METODOLOGIA NUMERICA (PLAXIS)

Obtenemos en la simulación con el software el asentamiento o desplazamiento del grupo de pilotes en un suelo cohesivo no drenado.

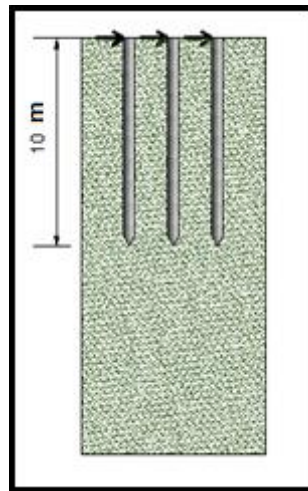
**Figura 42. Diagrama de desplazamientos verticales en grupo de pilotes  
Plaxis ( suelo cohesivo en condiciones no drenadas)**



## 5. CAPACIDAD ÚLTIMA HORIZONTAL ASENTAMIENTOS DE UN GRUPO DE PILOTES

### EMPLEANDO METODOLOGIAS CONVENCIONALES

Figura 43. Esquema de grupos de pilotes cargado horizontalmente



*Fuente: Registro Propio*

### 5.1. CARGA ÚLTIMA APLICADA HORIZONTAL

Inicialmente encontramos la eficiencia del grupo de pilotes

$$E_g = \frac{2 * n + m - 2 * s + 4 * D}{p * n * m}$$

$$E_g = \frac{2 * 3 + 1 - 2 * 1,8 + 4 * 0,6}{1,88 * 3 * 1} = 1,7$$

Como  $E_g \geq 1$  entonces la capacidad de carga del grupo de pilotes es:

$$Q_{g u} = Q_u$$

Anteriormente habíamos evaluado los asentamientos con una carga de 1000KN la cual tomaremos para poder comparar resultados

$$Q_u \text{ suelo granular} = 1000 \text{ KN}$$

Entonces la capacidad de grupo de pilotes para los diferentes tipos de estrato es

$$Q_{g u} = 3 * 1000 \text{ KN} = 3000 \text{ KN}$$

#### CASO 1 : SUELO GRANULAR

#### **ASENTAMIENTO**

Asentamiento elástico del grupo de pilote es:

$$S_{g(e)} = \frac{B_g}{D} * S$$

Donde

$B_g$ : ancho de la seccion del grupo de pilotes

$D$ : Dimetro de cada pilote en el grupo

$s$ : asentamiento elastico de cada pilote ( hallado anteriormente)

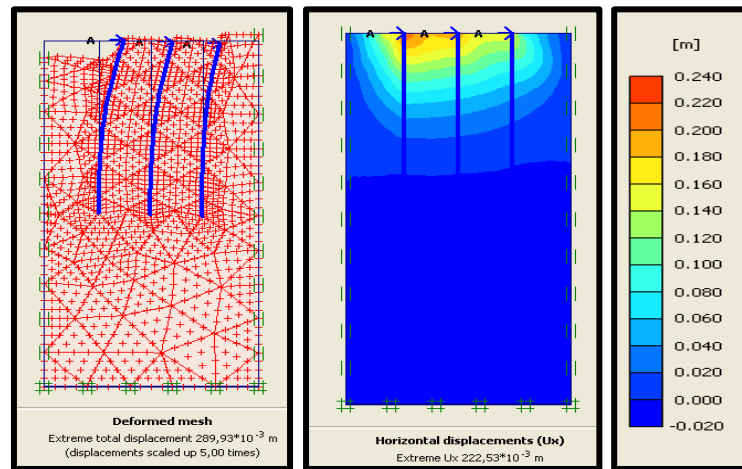
$$S_{g e} = \frac{4,2}{0,6} * 1,252 * 10^{-6}$$

$$S_{g e} = 3,31 * 10^{-6} m$$

## EMPLEANDO METODOLOGIA NUMERICA (PLAXIS)

Encontramos el desplazamiento relativo de cada pilote, el cual es 0.75, 1.012, 0.67 [cm] respectivamente, con una falla bajo 1000 [KN]

**Figura 44. Diagrama de desplazamientos horizontales en grupo de pilotes plaxis para carga lateral de 1000 KN (Suelo granular)**



## CASO 2: SUELO COHESIVO

## EMPLEANDO METODOLOGIAS CONVENCIONALES

### **ASENTAMIENTO PARA LA CARGA DE 1000KN**

Asentamiento elástico del grupo de pilote es:

$$S_{g(e)} = \frac{Bg}{D} * S$$

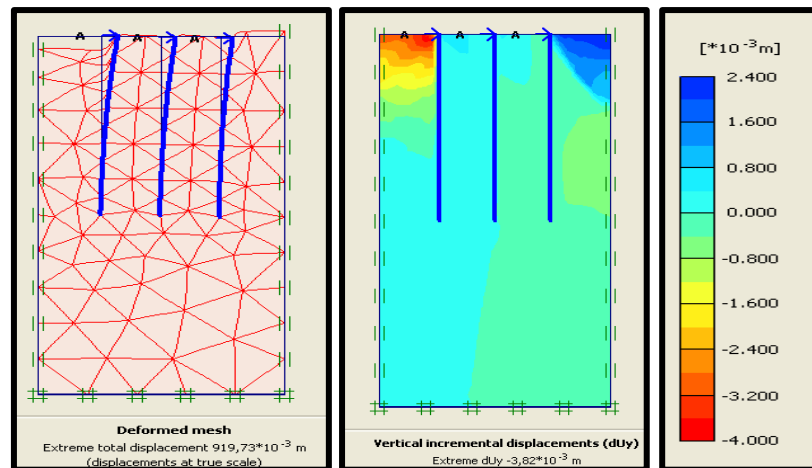
$$S_{g e} = \frac{4,2}{0,6} * 1,252 * 10^{-6}$$

$$S_{g e} = 3,31 * 10^{-6}m$$

## EMPLEANDO METODOLOGIA NUMERICA (PLAXIS)

Encontramos el desplazamiento relativo de cada pilote, el cual es 4.46, 2.18, 8.99 [cm] respectivamente, con una falla bajo 1000 [KN]

**Figura 45 Diagrama de desplazamientos horizontales en grupo de pilotes plaxis para carga lateral de 1000 KN (Suelo cohesivo)**



## 6. CONCLUSIONES

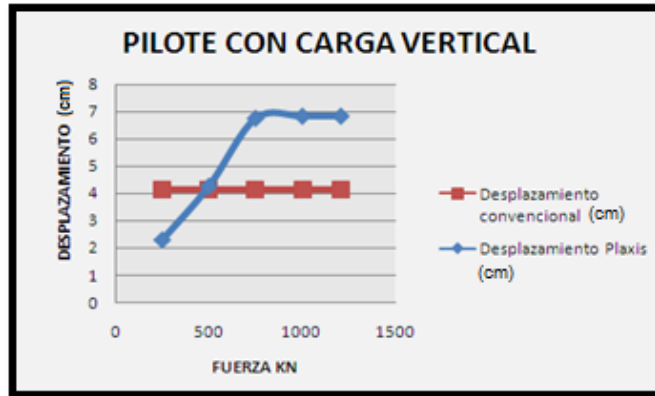
### **PILOTE CON CARGA VERTICAL**

Mediante el software PLAXIS se pudo modelar el comportamiento de pilotes mediante las solicitaciones de diferentes fuerzas aplicadas, los cuales se calcularon de la forma convencional para lograr obtener las siguientes conclusiones por medio de su comparación:

- Al suministrarle una interfaz al modelo del pilote, lo que se busca es generar un espesor virtual o una dimensión imaginaria para el material del elemento, con el fin de disminuir las deformaciones elásticas. en la simulación realizada del pilote con interfaz, sometido a carga vertical no se encontró diferencia en los resultados de desplazamiento, por lo contrario que se evidencio incremento en la capacidad de carga del pilote, ya que con dicha interface se intenta brindar una especie de confinamiento al elemento estructural.
- Mediante los modelos mostrados anteriormente, realizados utilizando las opciones de materiales que permite el software PLAXIS, elástico y elástico-plástico respectivamente, no se evidencio gran diferencia entre los resultados de capacidad de carga y asentamientos de estas dos modalidades.
- Para el pilote en arena se evidencio diferencia en los resultados de desplazamientos hallados de las dos formas: PLAXIS se adapta más a las condiciones de la afectación del estrato mostrando los desplazamientos de una forma más detallada, ya que en la manera convencional para hallar los desplazamientos por fricción y por punta, el factor de rigidez se encuentra en el

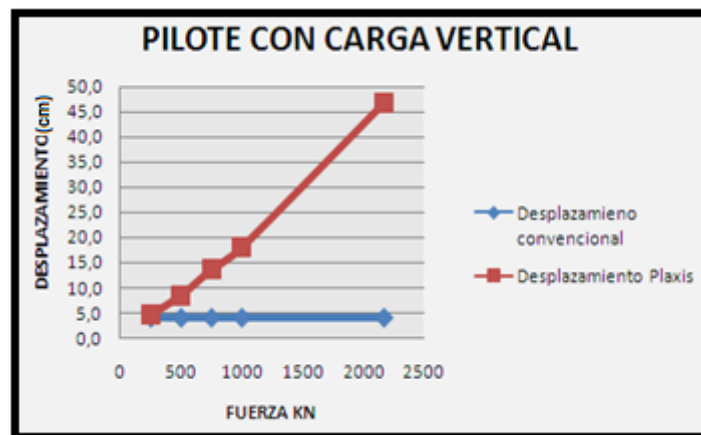
mismo rango según la tabla 2 (de 100 a 1000 KN) lo cual va a generar valores prácticamente constantes. En la siguiente grafica se puede observar la comparación de las dos alternativas.

**Grafica 1: fuerza/desplazamiento para pilote en interacción con arena**



- Para el pilote instalado en arcilla drenada, se evidencia que los resultados del software son más conservadores ya que muestra una falla para una carga de 1000 KN aproximadamente, en cambio en la forma convencional se espera una falla bajo la carga de 2171 KN aproximadamente.

**Grafica 2: fuerza/desplazamiento para pilote en interacción con arcilla drenada**



- En el caso de pilotes en estrato de arcillas no drenadas se encontró que ambos métodos coinciden en los resultados de capacidad de carga del pilote, pero en los desplazamientos la técnica convencional muestra ser más conservadora , esto se debe a lo mencionado anteriormente , la forma convencional para hallar asentamientos depende de una manera más representativa del estrato mas no de la carga aplicada lo cual se puede sustentar de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$S = S_a + S_{punta} + S_{fricción}$$

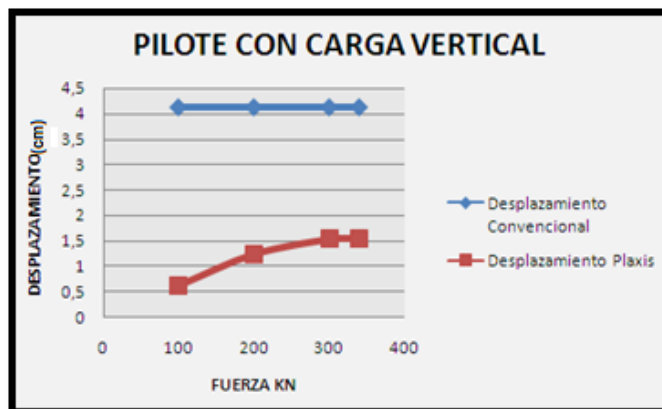
$$S_a = Q_{punta} + \frac{2}{3} S_f \frac{L}{A * E_c}$$

$$S_{punta} = C_t * \frac{factor\ de\ relación}{D * Q_{ult}}$$

$$S_{fricción} = C_s * \frac{1 - factor\ de\ relación}{L}$$

Como se puede observar la componente que depende de una forma directa con la carga aplicada es el desplazamiento elástico  $S_a$  , pero su aporte no es tan significativo ya que este término es pequeño por la división en el módulo de elasticidad del concreto.

**Grafica 3: fuerza/desplazamiento para pilote en interacción con arcilla no drenada**

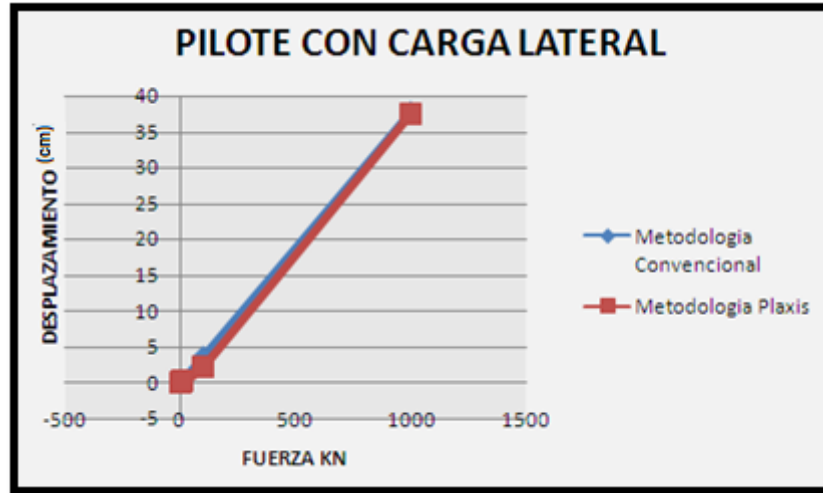


## **PILOTE CON CARGA LATERAL**

- Con las interpretaciones del método de Broms empleado para el análisis de pilotes cargados lateralmente, relacionamos que en un elemento corto la rigidez es tal que la falla se producirá por desplazamientos horizontales excesivos esto debido principalmente a la plastificación del suelo por el contrario un elemento largo relativamente flexible sufrirá deformaciones que causaran la formación de articulaciones en algunas secciones del elemento y eventualmente su rotura.
- Con el pilote instalado en un suelo cohesivo observamos el análisis que se le aplico desde una metodología convencional y una metodología computaciones Plaxis, donde generábamos cargas laterales observando sus correspondientes desplazamientos y llevando el elemento a un estado de rotura. Se evidencia que los desplazamientos horizontales predichos por el método son mayores que los predichos por el cálculo numérico

<b>SUELO COHESIVO</b>		
<b>Fuerza Horizontal (KN)</b>	<b>Desplazamiento empleando metodología convencional (cm)</b>	<b>Desplazamiento empleando Plaxis(cm)</b>
1	0,0359	0,018
10	0,36	0,14
100	3,6	2,2
1000	37,64	37,5

**Grafica 4: fuerza/desplazamiento para pilote en interacción con suelo cohesivo**

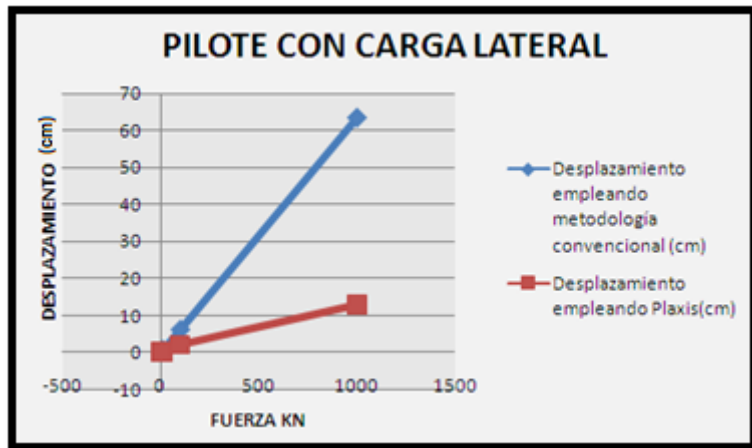


Realizando el análisis de cada carga lateral, el programa Plaxis generó un rotura del elemento cuando es sometido a una carga de 1000 KN máxima carga aplicada contrario al método convencional donde arrojó según el método de Broms que la carga ultima del pilote es de 378 KN, en este caso es más conservador la metodología convencional por que ofrece un valor de resistencia del suelo que es menor al calculado por el programa.

- El mismo caso sucede cuando el pilote está instalado en un suelo granular y es cargado por una fuerza externa lateral, se realizó el análisis mediante las dos metodologías: convencional y Plaxis, obteniendo resultados más conservadores en la segunda mostrados en la siguiente gráfica:

SUELO GRANULAR		
Fuerza Horizontal (KN)	Desplazamiento empleando metodología convencional (cm)	Desplazamiento empleando Plaxis(cm)
1	0,0612	0,012
10	0,612	0,11
100	6,12	2
1000	63,57	13

**Grafica 5: fuerza/desplazamiento para pilote en interacción con suelo granular**



El análisis en Plaxis del pilote cargado lateralmente, generó un estado de falla del elemento cuando este es sometido a una carga de 1000 KN, contrario a la metodología convencional donde me indica según el método de Broms que la carga ultima del pilote es de 575,7 KN. En este caso es más conservador la metodología convencional por que ofrece un valor de resistencia del suelo que es menor al calculado por el programa.

### **GRUPO DE PILOTES CARGADO VERTICALMENTE**

- El grupo de pilotes, que consta de tres elementos cargados verticalmente por una fuerza instalado en un suelo granular fue sometido a las dos metodologías: convencional y computaciones Plaxis obteniendo en resumen los siguientes resultados:

<b>SUELO GRANULAR</b>		
<b>Fuerza (KN)</b>	<b>Desplazamiento por metodología convencional (cm)</b>	<b>Desplazamiento por metodología Plaxis(cm)</b>
3619,797	0,00392	0,011

Observamos que en el grupo de pilotes los asentamientos en los dos métodos son muy mínimos esto debido a que los asentamientos se distribuyen en los tres pilotes generando una superposición de esfuerzos de los elementos. Es notorio que el método computacional Plaxis es más conservativo porque está diciendo que a un mismo nivel de carga se desarrollan más asentamientos que por el cálculo de la metodología convencional.

- La eficiencia del grupo de pilotes es una función de la distancia entre ellos por lo tanto son más efectivos entre más separados estén los pilotes.
- En un suelo cohesivo drenado el grupo de pilotes cargado verticalmente generó los siguientes resultados, realizando el análisis por metodologías convencionales y por Plaxis:

<b>SUELO COHESIVO DRENADO</b>		
<b>Fuerza (KN)</b>	<b>Desplazamiento por metodología convencional (cm)</b>	<b>Desplazamiento por metodología Plaxis(cm)</b>
6513,927	0,00707	0,008

En este caso de suelo observamos que los dos métodos me arrojan un valor de desplazamiento vertical parecido, lo que me indica que las dos metodologías aplicadas me generan resultados similares.

- En un suelo cohesivo no drenado el grupo de pilotes cargado verticalmente generó los siguientes resultados, realizando el análisis por metodologías convencionales y por Plaxis:

<b>SUELO COHESIVO DRENADO</b>		
<b>Fuerza (KN)</b>	<b>Desplazamiento por metodología convencional (cm)</b>	<b>Desplazamiento por metodología Plaxis(cm)</b>
1019,415	0,00111	0,004

Igualmente las dos metodologías me arrojan valores de desplazamientos muy similares del grupo de pilote cargado verticalmente.

### **GRUPO DE PILOTES SOMETIDO A CARGA HORIZONTAL**

- De las dos formas de obtener los asentamientos , ya sea por el método convencional o por el software PLAXIS , se encuentran valores pequeños debido a la densificación del estrato , el cual adquiere mayor resistencia por la

presencia de los elementos estructurales , como se puede apreciar el menor desplazamiento lo tiene el punto de aplicación del pilote del centro.

## BIBLIOGRAFIA

- DAS, BRAJA .Principio de ingeniería de cimentaciones. Thompson Learning.
- PLAXIS. General Information
- PLAXIS. Reference Manual
- PLAXIS. Tutorial Manual
- POULOS DAVIS, Pile foundation Analysis and design.
- VINICIO A. SUAREZ CHACON Y MERVYN J. KOWALSKY. Diseño sísmico de pilas con pilotes pre-barrenados incluyendo la interacción: suelo-estructura.
- RUWAN RAJAPAKSE, CCM, CCE, PE. Pile Design and Construction Rules of Thumb.