

**ANÁLISIS DE CAPACIDAD PORTANTE DE PILOTES MEDIANTE EL USO DE
ELEMENTOS FINITOS**

SAUL ALBEIRO CHACON ACEVEDO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2016**

**ANALISIS DE CAPACIDAD PORTANTE DE PILOTES MEDIANTE EL USO DE
ELEMENTOS FINITOS.**

SAUL ALBEIRO CHACON ACEVEDO.

**Trabajo de grado en la modalidad de investigación para optar por el título de
ingeniero civil**

**DIRECTOR
WILFREDO DELTORO RODRÍGUEZ
Ingeniero Civil, M.SC.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2016

DEDICATORIA

A DIOS

Mi guía y mi fortaleza, quien sostiene mi vida cada día de mi existencia.

A MI MADRE DORA ELVIA ACEVEDO

Tu amor incondicional, tus consejos y oraciones, este pequeño logro es tuyo.

A MI PADRE SAULO CHACON

Tu apoyo, confianza y tus oraciones, este pequeño logro es tuyo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a DIOS, porque todo se lo debo a Él, cualquier logro acá en esta vida pasajera, es por su voluntad, su misericordia, su bondad tan infinita. A mi familia, mis padres Saulo Chacón Pérez y Dora Elvia Acevedo, mis hermanos, por su apoyo incondicional, sacrificio, oraciones, han sido mi motivación el motor de mi vida. A la Universidad Industrial de Santander, escuela de Ingeniería Civil al grupo de profesores comprometidos con seguir construyendo futuro en especial el ingeniero Wilfredo DelToro Rodríguez quien ha tenido la disposición para ser mi director de proyecto, al ingeniero Héctor Torres, por su asesoría en la ejecución de la tesis al grupo de investigación Geomántica por facilitar los programas computacionales usados en este proyecto. Por último agradezco a la familia Cerveleon ,a Javier Valbuena, por adoptar este hijo Boyacense en tierras santandereanas y a cada una de aquellas personas que han aportado directa o indirectamente en este proceso de formación, muchas gracias Dios los bendiga.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	15
1. OBJETIVOS.....	17
1.1 OBJETIVO GENERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD PORTANTE.....	18
2.1 PRUEBAS DE CARGA A ESCALA REAL	18
2.2 MÉTODOS ESTÁTICOS.....	18
2.2.1 Análisis basados en propiedades del suelo	19
2.2.2 Análisis basados en ensayos realizados in-situ	19
2.3 MÉTODOS DINAMICOS.....	19
3. PLANTEAMIENTO DEL MODELO GEOTECNICO	21
4. MÉTODOS ANALÍTICOS.....	23
4.1 MÉTODO DE POULOS Y DAVIS	23
4.1.1 Arcillas drenadas	24
4.1.2 Arenas.....	24
4.2 MÉTODO DE MEYERHOF	26
4.2.1 Arena	26
4.2.1.1 Capacidad de carga por punta.....	26
4.2.1.2 Capacidad de carga por fricción	29
4.3 CAPACIDAD DE CARGA A PARTIR DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR.....	31
5 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	32
5.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE.....	32

5.2 METODOLOGÍA	33
5.2.1 Datos información del suelo dimensiones del pilote.	33
5.2.2 Ingreso de datos al software	35
5.3 RESULTADOS.....	36
6. COMPARACION DE RESULTADOS.....	38
6.1 RESUMEN DE LA APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS ANALÍTICOS Y SUS PARÁMETROS.....	38
7. CONCLUSIONES	40
8. RECOMENDACIONES.....	41
BIBLIOGRAFIA.....	42
ANEXOS	44

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Perfil estratigráfico, parámetros, tipo de pilote a utilizar y diagrama de esfuerzos	22
Figura 2. Parámetros generales: rigidez, resistencia y de flujo.....	35
Figura 3. Asignación de carga	35
Figura 4. Perfil estratigráfico, aplicación de la carga.....	36
Figura 5. Malla deformada	36
Figura 6. Esfuerzo vs Deformación.....	37

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica 1. Valores de Z_c/d y $k_{stan\phi a}$ para pilotes en arenas	25
Grafica 2. Relación N_q y ϕ para pilotes en arenas.....	26
Grafica 3. Variación de la resistencia unitaria de punta en arena homogénea	27
Grafica 4. Variación $(L_b/D)_{cr}$ con ϕ	27
Grafica 5. Variación de valores máximos de N^*c y N^*q con ϕ	28
Grafica 6. Resistencia por fricción unitaria para pilotes en arena	30

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Sondeo.....	21
Tabla 2. Valores promedios recomendados para el cálculo de K:	30
Tabla 3. Unidades Utilizas	33
Tabla 4. Resultado obtenido con el software Plaxis 2D	37
Tabla 5. Resultados obtenidos por los métodos	38

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. VALORES OBTENIDOS PARA: MÓDULO DE ELASTICIDAD, COEFICIENTE DE POISSON.....	44
ANEXO B. CALCULO DEL ESFUERZO.....	45
ANEXO C. CÁLCULOS PARA DETERMINAR ÁNGULOS DE FRICCIÓN Y LA COHESIÓN.....	46
ANEXO D. MÉTODOS ANALÍTICOS - MÉTODO DE POULOS Y DAVIS.....	47
ANEXO E. MÉTODOS ANALÍTICOS - MÉTODO DE MEYERHOF. F(N)	49
ANEXO F. MÉTODOS ANALÍTICOS - MÉTODO DE MEYERHOF. (GRANULARES).....	51

RESUMEN

TÍTULO: ANALISIS DE CAPACIDAD PORTANTE DE PILOTES MEDIANTE EL USO DE ELEMENTOS FINITOS.*

AUTOR: SAUL ALBEIRO CHACON ACEVEDO**

PALABRAS CLAVE: Pilotes, Capacidad portante en pilotes, Cimentaciones profundas, Métodos de análisis Elementos finitos.

DESCRIPCIÓN:

En este artículo se ha de llevar a cabo el siguiente análisis de capacidad portante en pilotes, el cual se realizó por algunos métodos analíticos como lo son el método de Meyerhof y el de Poulos & Davis, de igual manera con el uso de software Plaxis 2D, con el propósito de afinar resultados y conocer una herramienta más para el análisis de capacidad de carga de pilotes. Para efectuar y calcular con los distintos métodos se partió de conocer el perfil estratigráfico del suelo, luego proponiendo el tipo de pilote a utilizar, en este caso es un pilote hincado. Para métodos analíticos, se evalúa su capacidad portante. Cada uno de los métodos utiliza parámetros que han sido obtenidos mediante ensayos de laboratorio o correlaciones con los valores de N (SPT). Los elementos finitos son un método numérico general utilizado en ingeniería y física, desarrollado para ser usado en computadoras; esta herramienta puede proporcionar una buena aproximación de la capacidad de carga de los pilotes. Los análisis que se llevan a cabo por los distintos métodos no son muy exactos entre ellos, las causas están en que cada uno trabaja diferentes variables establecidos por cada autor, a su vez que se disponga de información confiable respecto a los parámetros del suelo. Cabe decir que la utilización de estos métodos y de otros más se hace de manera responsable con el fin de dar soluciones relacionadas al análisis de la capacidad portante de pilotes.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Wilfredo DelToro Rodríguez, Ingeniero Civil. M.SC.

ABSTRACT

TITLE: Analysis of bearing capacity of piles through the use of finite elements.*

AUTHOR: SAUL ALBEIRO CHACON ACEVEDO**

KEYWORDS: Piles, Capacity load in piles, Foundations deep, Methods of analysis elements finite.

DESCRIPTION

In this article it has to carry out the following analysis of bearing capacity in pile, which was carried out by some analytical methods such as the method of Meyerhof and Poulos & Davis, similarly with the use of software Plaxis 2D, in order to refine results and know one more tool for the analysis of load capacity of piles. To make and calculate with different methods split of Stratigraphic profile of soil, then proposing the type of pile used in this case is a driven pile. For analytical methods, evaluate their load capacity. Each of the methods uses parameters that have been obtained by laboratory tests or correlations with values of N (SPT). The finite elements are a general numerical method used in engineering and physics, developed to be used in computers; this tool can provide a good approximation of the carrying capacity of the piles. Analyses that are conducted by the various methods are not very accurate among them, the causes are that each work different variables established by each author, at the same time that you have reliable information regarding the parameters of the soil. It must be said that the use of these methods and others is responsibly in order to provide solutions related to the analysis of the bearing capacity of piles.

* Working Grade

** Physico-mechanical Engineering Faculty of the School of Civil Engineering, Director: Wilfredo DelToro Rodríguez, Civil Engineer. M.SC. in geotechnics.

INTRODUCCION

Todas las estructuras requieren de cimentaciones ya sean superficiales o profundas, y obtener la capacidad de carga es de vital importancia especialmente cuando el estrato competente al cual transmitir los esfuerzos verticales, no se hallan a una distancia económicamente viable. Con base a un muestreo inalterado, hecho en campo se determinan las propiedades mecánicas de la estratigrafía del sub-suelo

El analizar la capacidad portante se refiere básicamente a tener una aproximación de forma cuantitativa en el aporte tanto por fricción como por punta y de esta manera tomar una decisión acertada para la estructura. De manera analítica los métodos que común mente utilizan los autores son basados en la teoría de plasticidad en donde sustentan que la capacidad portante es obtenida por fricción lateral y la resistencia por punta sin embargo no necesariamente es igual a la suma de las cargas, porque se puede presentar la no simultaneidad de desplazamientos¹. Los parámetros que han empleado autores como Meyerhof, Terzaghi, Hansen entre otros son: la cohesión(c), ángulo de fricción (ϕ), peso unitario (γ), humedad natural (w), el valor de la resistencia a penetración estándar (N_{spt}), cada metodología tiene unos parámetros y criterios que varían de acuerdo con la del terreno (suelo) los cuales son indispensables para determinar la capacidad portante.

Los métodos de análisis para la determinación de la capacidad de carga que se llevará a cabo son de tipo teórico-práctico. Son Métodos Estáticos, aunque también existen los Métodos Dinámicos. Para el método de elementos finito se utilizara el software Plaxis 2D, el cual es un programa de ordenador de elementos

¹ El pilotaje. Monografía sobre cimentaciones sobre pilotes. Dr. Ing. Luis Orlando Ibañez Mora <http://www.ilustrados.com/tema/10084/Pilotaje.html>. Descargar documento <http://www.ilustrados.com/documentos/eb-E1%20pilotaje>. [citado 5 de septiembre de 2015]

finitos bidimensionales, diseñado para la realización de análisis de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos.² Los procedimientos que se efectúan son sencillos tanto de entrada como de salida y ofrece información para el desarrollo del modelo sea compresible, la parte de cálculo es aproximada, por lo cual es recomendable que los resultados no sean tomados en su totalidad confiables

² Manual de Referencia Plaxis 2D. <http://www.plaxis.nl/files/files/2D-2-Reference.pdf>. [citado 10 de septiembre de 2015]

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Con base en los parámetros mecánicos de una estratigrafía, determinados a partir de ensayos de laboratorio a muestras obtenidas en perforaciones, comparar los resultados de la capacidad portante hallados al emplear algunas teorías de cálculo de los elementos de cimentación profunda *pilotes* y el software Plaxis 2D.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proponer el perfil estratigráfico del terreno y el tipo de pilote a utilizar
- Calcular la capacidad portante del pilote por diferentes métodos de análisis
- Obtener la capacidad de carga mediante el uso del software Plaxis 2D
- Comparar los resultados teóricos con los obtenidos mediante el software
- Presentar las conclusiones

2. METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD PORTANTE

Metodologías de diseño de pilotes para evaluar la capacidad portante de un pilote sometido a carga axial. Las metodologías para determinar dicha carga son³:

2.1 PRUEBAS DE CARGA A ESCALA REAL

En esta metodología se implementan pruebas a escala real con pilotes cargados axialmente, siendo la más exacta para determinar la capacidad de carga axial del pilote de una manera experimental y también la más costosa. Las demás metodologías que determinan la capacidad portante lo realizan indirectamente con procedimientos teóricos o empíricos, los cuales tienen una menor precisión.

Esta metodología consiste en utilizar pilotes de reacción para así cargar axialmente un pilote a escala real utilizando vigas muy rígidas, de tal forma que se incremente el esfuerzo axial en una relación de 2 a 1, para así determinar la capacidad última del pilote y algunos factores que serán empleados en el cálculo de la capacidad última.⁴

2.2 MÉTODOS ESTÁTICOS

En esta metodología se realizan ensayos de las propiedades del suelo y con base a estos resultados, se estima la capacidad última del pilote. Los parámetros se obtienen de ensayos en laboratorios o pruebas in-situ, estos son susceptibles a tener una gran variabilidad en los resultados debido al suelo mismo o a los procedimientos implementados en los laboratorios. Las variaciones pueden sobreestimar la capacidad del pilote o subestimarla, conduciendo a que los

³ Ana María López Rovira y Juan Sebastián Murcia Plaza. Desarrollo de un Programa De Diseño Geotécnico de Pilotes en arenas y arcillas con carga axial empleando Métodos de Análisis Basados en Confiabilidad. [Tesis] Universidad Pontificia Javeriana. Bogotá, Colombia, Julio 2014

⁴Ibid. p 10.

cálculos realizados no sean del todo precisos y obliguen a emplear factores de corrección muy grandes.⁵

Los ensayos que se realizan para determinar las propiedades del suelo se dividen en dos grandes ramas:

2.2.1 Análisis basados en propiedades del suelo En estos análisis se determinan las propiedades del suelo mediante ensayos realizados en laboratorios, encontrando propiedades como: peso unitario, cohesión, fricción, relación de vacíos, relación de consolidación y demás, dependiendo de la metodología de cálculo seleccionada. Con las propiedades ya determinadas del suelo se procede a implementar alguna ecuación para determinar la capacidad del pilote

2.2.2 Análisis basados en ensayos realizados in-situ Los análisis realizados in-situ son aquellos mediante correlaciones, determinan las propiedades del suelo o dan una estimación de la capacidad última del pilote como los ensayos de Estándar Penetration Test y Cone Penetration Test.

2.3 MÉTODOS DINAMICOS

En estos ensayos se determina la capacidad axial de los pilotes dependiendo del grado de dificultad para hincarlos. Usualmente si el pilote presenta un mayor grado de dificultad para ser hincado es porque tiene una mayor capacidad última. La determinación de la resistencia se realizaba inicialmente con correlaciones de energía necesaria para hincar los pilotes variando parámetros como: la altura, el peso del martillo y el número de golpes necesarios. Estas correlaciones son conocidas como "pile driving formulas" y fueron objeto de muchas discusiones debido a que la determinación de la capacidad última del pilote se reducía a un

⁵ Ibid. p 11.

procedimiento y no poseía un análisis de fondo. Además, cuando estos métodos se evaluaban experimentalmente, presentaban incrementos en los asentamientos muy elevados, así que luego de la proposición de estas ecuaciones netamente dinámicas, se decidió tener en cuenta las ondas que se generaban en el suelo, debido al impacto del martillo, lo que conllevó a generar ecuaciones que tuviesen en cuenta la velocidad con la que viajaba la onda a través del pilote y el suelo. Hoy en día estas ecuaciones se han convertido en un control de los cálculos durante el proceso constructivo, ya que se ven afectadas por las condiciones fronteras del pilote con el suelo.⁶

⁶ Ibid. p 12.

3. PLANTEAMIENTO DEL MODELO GEOTECNICO

Para la elaboración del modelo geotécnico se partió de los datos suministrados de un estudio de suelos por sondeo, con realización del ensayo de penetración estándar, cuyos resultados se muestran en tabla 1.

Para obtener los parámetros de la cohesión(c), el ángulo de fricción (ϕ) se hará uso del método de estimación de parámetros efectivos de resistencia con spt. Este es un método aproximado de evaluación de los parámetros, se obtiene resultados razonables útiles iniciales, especialmente para materiales granulares o intermedios, siendo menos aproximados para materiales cohesivos.⁷

Tabla 1. Sondeo

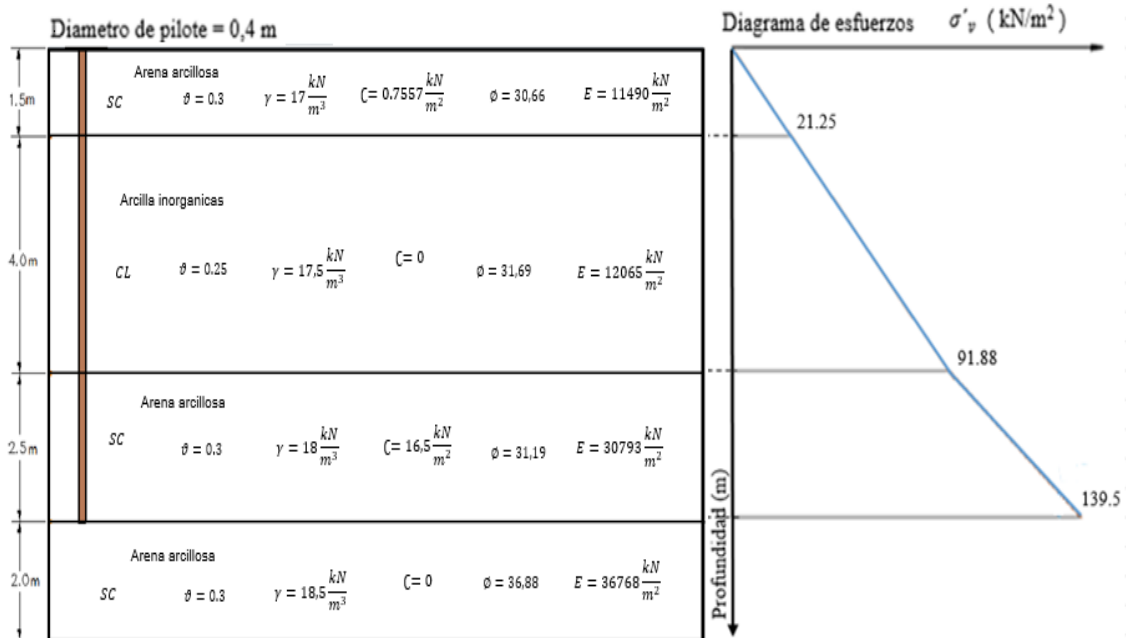
SONDEO A PERCUSION												
Profundidad de nivel freático.				NO	Profundidad sondeo (mts)				10			
Pesa. (lbs)				140	Caída libre. (pul)				30			
Fecha de iniciación: Febrero 15 de					Fecha de terminación: Febrero 15 de							
Profundidad	No. Golpes			N	$\bar{\gamma} \left(\frac{kN}{m^3} \right)$	DESCRIPCION DE LOS SUELOS						
	6"	12"	18"									
0.0	0.5	5	11	8	19	SC						
0.5	1.0	8	7	7	14	G	A	F	LL	LP	IP	%W
1.0	1.5	6	6	6	12	7	47.5	45.	31	22	9	16.2
1.5	2.0	7	7	6	13							
2.0	2.5	6	5	4	9							
2.5	3.0	4	5	5	10	CL						
3.0	3.5	5	5	6	11	G	A	F	LL	LP	IP	%W
3.5	4.0	6	8	9	17	0.2	48.	50.	31	21	10	21
4.0	4.5	10	10	9	19							
4.5	5.0	8	9	9	18							
5.0	5.5	8	12	17	29							
5.5	6.0	21	22	23	45							
6.0	6.5	15	16	20	36	SC						
6.5	7.0	18	18	21	39	G	A	F	LL	LP	IP	%W
7.0	7.5	19	19	20	39	1.5	54.	43.	29	21	8	17.6
7.5	8.0	20	20	22	42							
8.0	8.5	21	22	24	46							
8.5	9.0	22	23	23	46	SC						
9.0	9.5	23	25	25	50	G	A	F	LL	LP	IP	%W
9.5	10	22	24	26	50	6.7	50.	42.	29	21	8	15.4

Fuente: Director de proyecto

⁷Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con spt. <http://www.scg.org.co/wp-content/uploads/ESTIMATIVOS-DE-PARAMETROS-DE-RESISTENCIA-CON-SPT.pdf>. citado 10 de agosto 2015] <http://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/15050?mode=full>

Obtenido los parámetros necesarios para la utilización en los métodos analíticos y el uso del software para obtener la capacidad de portante se presenta el perfil estratigráfico figura 1.

Figura 1. Perfil estratigráfico, parámetros, tipo de pilote a utilizar y diagrama de esfuerzos



Los valores obtenidos de Modulo de elasticidad, coeficiente de poisson, esfuerzos, cohesión y ángulo de fricción se pueden observar en anexos.

4. MÉTODOS ANALÍTICOS

Con los parámetros hallados se realiza el análisis basado en las propiedades del suelo con el método de Meyerhof, Poulos y Davis. La fórmula general de capacidad de carga considera una resistencia por fricción generada en la interfaz suelo-pilote y una componente de resistencia por la reacción de la punta del pilote contra el suelo

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

Donde: Q_u = Capacidad ultima del pilote

Q_s = Resistencia por fricción

Q_{up} = Capacidad de carga de la punta del pilote

W_p = Peso del pilote

4.1 MÉTODO DE POULOS Y DAVIS

Basados en las experiencias obtenidas por varios autores como, Tomlinson, Meyerhof, Vesic y otros, Poulos y Davis (1980), propusieron el siguiente método de análisis de capacidad de carga en pilote:⁸

-Capacidad de carga:

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

-Capacidad ultima por punta

⁸Yelenith Vitalia Becerra Pinto y Joaquín Dario Gómez Delgado. Estado del arte en el análisis y procesos constructivos de cimentaciones profundas. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Industrial De Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingeniería Civil. 2009

$Q_{up} = A_p (cN_c + \sigma_{vb}^- N_q + 0.3\gamma DN_\gamma)$: Los factores N_c y N_q por ser mínimos.

Carga ultima por fricción

$$Q_s = \int_0^L P(\sigma_{vb}^- k_s \tan \phi_a) dz$$

Donde: A_p = área del pilote

c = Cohesión vertical efectivo en la punta

σ_{vb}^- = Esfuerzo vertical efectivo en la punta

N_c , N_q , N_γ = Factores de capacidad de carga

P = Perímetro del pilote

D = Diámetro del pilote

σ_{vb}^- = Esfuerzo vertical efectivo medio en la longitud

ϕ_a = ángulo de fricción suelo-pilote.

4.1.1 Arcillas drenadas Para esta condición se asume $c=0$ por lo tanto $C_a=0$ y la ecuación se reduce a

$$Q_u = A_p \sigma_{vb}^- N_q + \int_0^L P(\sigma_{vb}^- k_s \tan \phi_a) dz$$

Arcillas normalmente consolidadas

$k_s \tan \phi_a$, este factor se obtiene de los aportes hechos por Burland (1973), y Meyerhof (1976), los cuales sugieren:

$$k_s \tan \phi_a = \beta \quad \beta = (1 - \sin \phi) \tan \phi \quad 0.24 < \beta < 0.29 \quad \text{Para } 20^\circ < \phi < 30^\circ$$

4.1.2 Arenas

$$Q_u = A_p \sigma_{vb}^- N_q + \int_0^L P(\sigma_{vb}^- k_s \tan \phi_a) dz$$

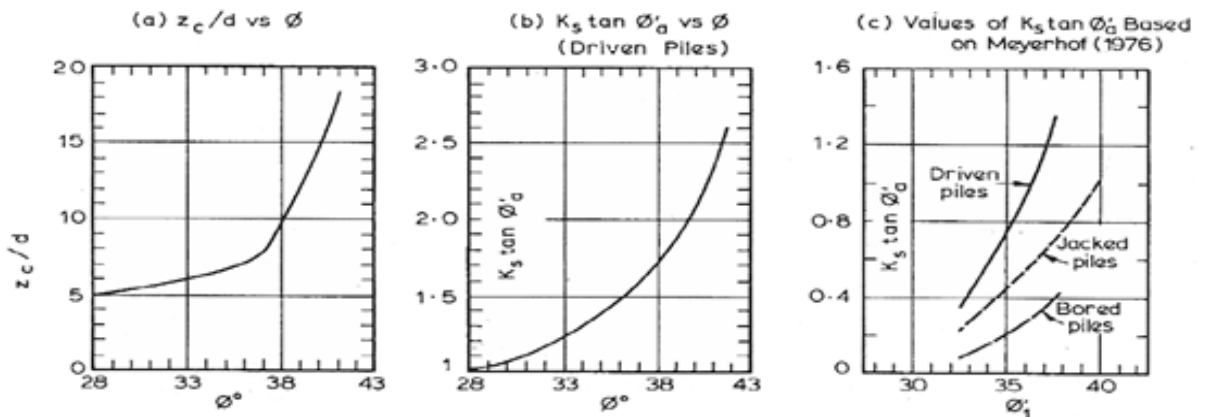
Correcciones del ángulo ϕ para hallar los valores de Z_c/d y $k_s \tan \phi_a$:

Z_c/d : Sirve para ver el cambio de esfuerzo a determinada longitud dentro del estrato (de estado lineal variable a homogéneo). Para el perfil propuesto no es utilizado.

-Para pilotes hincados: $\phi = \frac{3}{4}(\phi_1) + 10$ de grafica 1 b

-Para pilotes perforados: $\phi = \phi_1 - 3$ de la gráfica 1 c

Grafica 1. Valores de Z_c/d y $k_s \tan \phi_a$ para pilotes en arenas



Fuente: Poulos y Davis (1980)

Correcciones del ángulo ϕ para hallar el valor de N_q

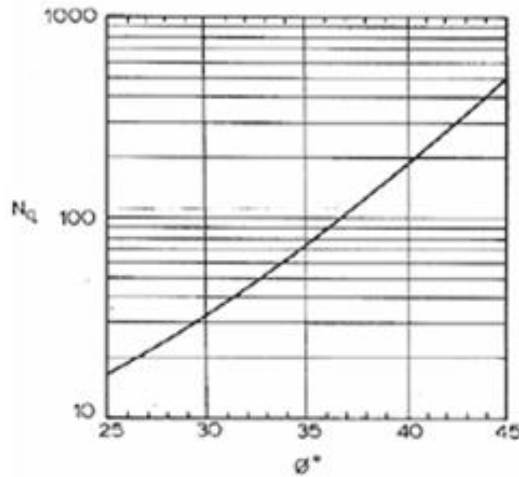
-Para pilotes hincados: $\phi = \frac{\phi_1 + 40}{2}$ de la gráfica 2

-Para pilotes perforados: $\phi = \phi_1 - 3$ de la gráfica 2

-Donde ϕ_1 = ángulo de fricción del suelo

ϕ = ángulo de fricción corregida

Grafica 2. Relación N_q y ϕ para pilotes en arenas



Fuente: Poulos y Davis (1980)

4.2 MÉTODO DE MEYERHOF

4.2.1 Arena

4.2.1.1 Capacidad de carga por punta. Q_{up} Meyerhof (1976) estableció la relación de variación de L_b/D con el ángulo de fricción del suelo en el estrato de apoyo ϕ (en grados), del cual se determinan los factores de capacidad de carga

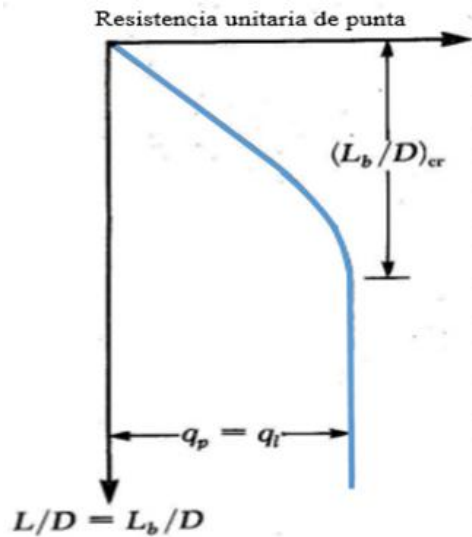
Meyerhof (1976) estableció la relación de variación de L_b/D con el ángulo de fricción del suelo en el estrato de apoyo ϕ (en grados), del cual se determinan los factores de capacidad de carga

Donde: L_b = longitud de penetración en el estrato de apoyo

La capacidad de punta de un pilote en arena crece generalmente con la profundidad de empotramiento en el estrato de apoyo y alcanza un valor máximo para una relación de empotramiento $L_b/D = (L_b/D)_{cr}$

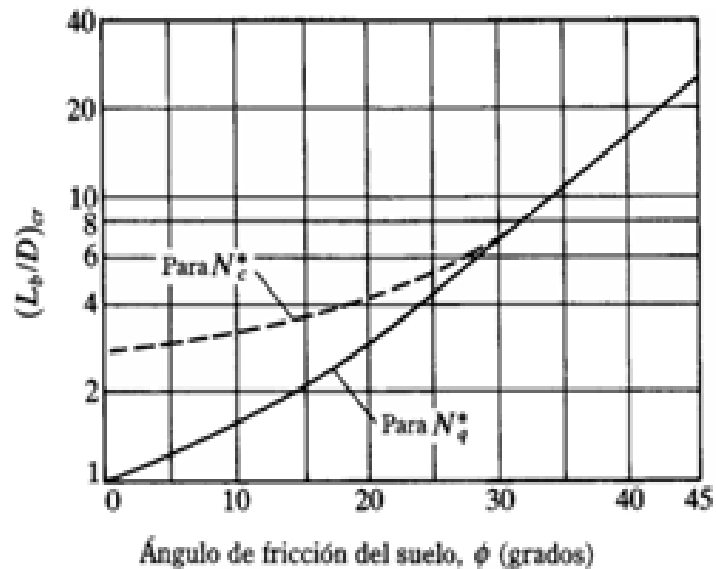
En el caso en que el pilote penetre en un estrato de apoyo, $L_b < L$ se observa que después de $(L_b/D)_{cr}$ el valor de $q_p = q_t$, tal como se observa en la figura en la gráfica 3.

Grafica 3. Variación de la resistencia unitaria de punta en arena homogénea



Fuente: Meyerhof 1976

Grafica 4. Variación $(L_b/D)_{cr}$ con ϕ .

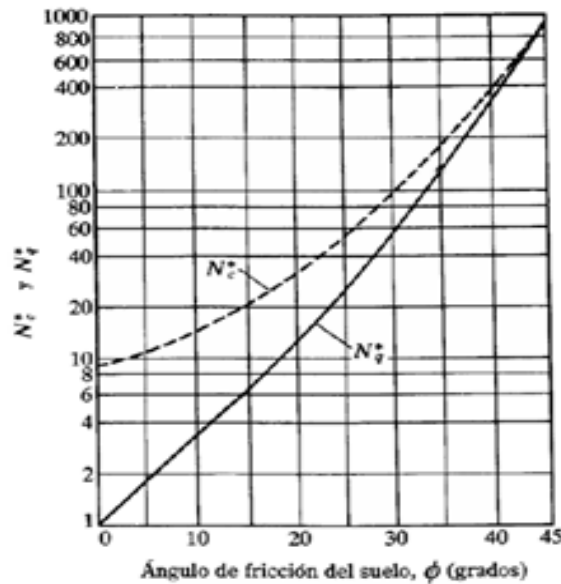


Fuente: Meyerhof 1976

De la gráfica 4 se puede apreciar la variación de N_c^* y N_q^* los factores respecto a la relación L_b/D y el ángulo de fricción del suelo ϕ . Estos factores alcanzan un valor máximo en $L_b/D = 0.5 ((L_b/D)_{cr})$. La figura nos indica que $(L_b/D)_{cr}$ para $\phi = 45$ es aproximadamente de 25 y decrece al disminuir el ángulo de fricción.

Generalmente en pilotes la magnitud $L_b/D > 0.5(L_b/D)_{cr}$ por tanto para la estimación de estos valores máximos de N_c^* y N_q^* se obtienen de la gráfica 5.

Grafica 5. Variación de valores máximos de N_c^* y N_q^* con ϕ .



Fuente: Meyerhof

Si tomamos pilotes en arenas con $c=0$ la ecuación se simplifica como:

$$Q_{up} = A_p q_p = A_p (cN_c^* + q'N_q^*) \longrightarrow Q_{up} = A_p q_p = A_p (q'N_q^*)$$

Donde q' = esfuerzo vertical efectivo a nivel de la punta del pilote. $\rightarrow q' = L * \gamma$

L = longitud del pilote

γ = Peso unitario la punta del pilote

Sin embargo, Q_{up} no debe exceder el valor límite $A_p q_l$ por lo tanto

$$Q_{wp} = A_p q' N_q^* \leq A_p q_l$$

De donde la resistencia limite es

$$q_l (KN/m^2) = 50 N_q^* \tan \phi \quad \circ \quad q_l (lb/pies^2) = 1000 N_q^* \tan \phi$$

4.2.1.2 Capacidad de carga por fricción Q_s . Para el cálculo de la resistencia unitaria por fricción (f) se debe tener en cuenta la instalación del pilote, porque en el caso de pilotes hincados en arena la vibración generada en el hincado interviene en la densificación del suelo contiguo.

La variación de f en el campo se puede apreciar aproximadamente en la gráfica 6, donde la fricción unitaria superficial crece con la profundidad más o menos linealmente hasta una profundidad de L' y después permanece constante

También se aprecia que la magnitud de la profundidad crítica L' esta entre 15 y 20 veces el diámetro del pilote del pilote. Por lo tanto

$$L' = 15D$$

D=Diámetro del pilote

$$\text{Para } z=0 \text{ hasta } z=L' \rightarrow f = k \sigma'_v \tan \delta$$

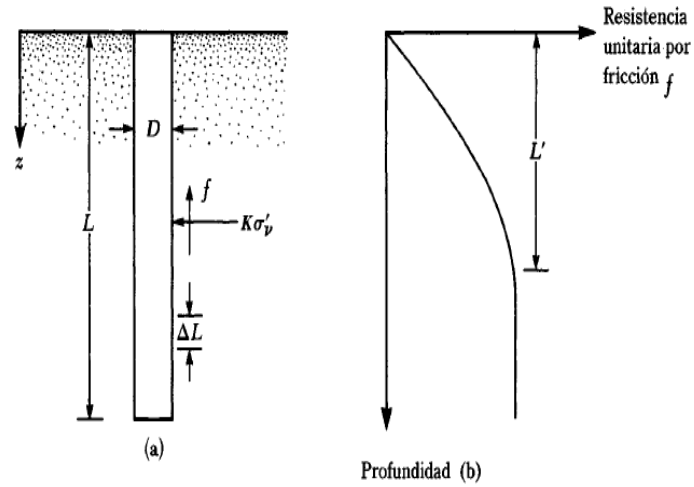
$$\text{Para } z=L' \text{ hasta } z=L \rightarrow f = f_{z=L'}$$

Donde k = coeficiente de presión lateral

σ'_v = Esfuerzo vertical efectivo medio a la profundidad considerada.

δ = ángulo de fricción entre suelo y pilote

Grafica 6. Resistencia por fricción unitaria para pilotes en arena



Fuente: Braja M Das

Tabla 2. Valores promedios recomendados para el cálculo de K:

TIPO DE PILOTE	K
Perforado	$\approx K_0 = 1 - \text{sen}\phi$
Hincado, de bajo desplazamiento	$\approx K_0 = 1 - \text{sen}\phi$ a $1.4 K_0 = 1.4(1 - \text{sen}\phi)$
Hincado, de alto desplazamiento	$\approx K_0 = 1 - \text{sen}\phi$ a $1.8 K_0 = 1.8(1 - \text{sen}\phi)$

Fuente: Braja M Das

Para los pilotes hincados de gran desplazamiento Bhusan (1982) recomendó

$$k \tan \delta = 0.18 + 0.0065 C_r \quad y \quad k = 0.5 + 0.008 C_r$$

Donde C_r = compacidad relativa (%)

$$Q_s = p * L * f$$

Donde:

p = Perimetro del pilote. L = longitud pitote

4.3 CAPACIDAD DE CARGA A PARTIR DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR

Meyerhof (1976) basado en estudios de campo sugirió que la resistencia de punta última en un suelo granular homogéneo $L = L_b$ se obtenga de los números de penetración estándar como, SPT:

$$q_p (KN/m^2) = 40N_{cor}L/D \leq 400N_{COR} \quad \text{O} \quad q_p (lb/pies^2) = 800N_{cor}L/D \leq 8000N_{COR}$$

$Q_{up} = A_p * q_p$ (KN) A_p = Área de punta de pilote; q_p = Capacidad de carga por punta ((KN/m²))

N_{COR} = Numero de penetración estándar corregido promedio cerca de la punta del pilote (aproximadamente arriba de la punta 10D y 4D debajo de la punta del pilote).

$Q_s = pL f_{prom}$ p = Perímetro del pilote. L = Longitud del pilote.
 f_{prom} = Resistencia Unitaria por fricción promedio a cualquier profundidad.

Meyerhof (1976) estableció la resistencia por fricción unitaria promedio como:

Para pilotes hincados de gran desplazamiento:

$$f_{prom} = \left(\frac{KN}{m^2}\right) = 2N_{cor}^- \quad \text{O} \quad f_{prom} = \left(\frac{lb}{pies^2}\right) = 40N_{cor}^-$$

Donde N_{cor}^- = valor corregido de la resistencia a la penetración estándar. Aproximadamente 10D arriba y 4D debajo de la punta del pilote.

Para pilotes hincados de pequeño desplazamiento:

$$f_{prom} = \left(\frac{KN}{m^2}\right) = N_{cor}^- \quad \text{O} \quad f_{prom} = \left(\frac{lb}{pies^2}\right) = 20N_{cor}^-$$

El ensayo solo es aplicable suelos arenosos. Para arenas finas y saturadas el N debe corregirse.

5. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

5.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

Plaxis 2D es un software de elementos finitos con el propósito de hacer análisis de la deformación y la estabilidad en lo relacionado a la geotecnia, permitiendo una interfaz comprensible donde se genera un modelo geométrico y una malla de elementos finitos con etapas de construcción, procedimientos detallados en cálculos, siendo una herramienta muy útil en desarrollo de problemas geotécnicos.

El método de los elementos 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 ensamble 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 método de elementos finitos, por lo tanto, se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, esta transformación se

denomina desratización 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 lo tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finitos puntos.⁹

5.2 METODOLOGÍA

Consiste en mostrar lo más relevante para calcular la capacidad portante del pilote.

5.2.1 Datos información del suelo dimensiones del pilote Ingreso de los parámetros: Para el desarrollo del cálculo se usó un pilote de diámetro 0,4m con longitud de 8m, según lo propuesto.

Tabla 3. Unidades Utilizas

<i>Parámetro</i>	<i>Unidad por defecto</i>	<i>Unidad inglesas</i>
<i>Longitud</i>	<i>m</i>	<i>in</i>
<i>Fuerza</i>	<i>KN</i>	<i>Lb</i>
<i>Tiempo</i>	<i>días (day)</i>	<i>seg</i>
<i>Coordenadas</i>	<i>m</i>	<i>in</i>
<i>Desplazamientos</i>	<i>m</i>	<i>in</i>
<i>Modulo de Young</i>	<i>KN/m² = Kpa</i>	<i>Psi = Lb/in²</i>
<i>Cohesión</i>	<i>KN/m² = Kpa</i>	<i>Psi = Lb/in²</i>
<i>Angulo de fricción</i>	<i>° deg</i>	<i>° deg</i>
<i>Angulo de dilatación</i>	<i>° deg</i>	<i>° deg</i>
<i>Unidades de peso</i>	<i>KN/m² = Kpa</i>	<i>Lb/cu in</i>
<i>Permeabilidad</i>	<i>m/day</i>	<i>in/seg</i>
<i>Carga puntual</i>	<i>KN</i>	<i>lb</i>
<i>Línea de carga</i>	<i>KN/m</i>	<i>lb/in</i>
<i>Carga distribuida</i>	<i>KN/m² = Kpa</i>	<i>Psi = Lb/in²</i>
<i>Esfuerzos</i>	<i>KN/m² = Kpa</i>	<i>Psi = Lb/in²</i>

Fuente: Trabajo de investigación¹⁰

⁹ Diana marcela Palacios valencia y Malory Rojas Castellanos.Evaluacion del comportamiento de pilotes mediante la técnica de elementos finitos: Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Industrial De Santander. Facultad de Ingenierías Fisico-Mecanicas Escuela de Ingeniería Civil.2012

¹⁰ Cristian Fernando Almeida Velandia y Miguel Angel Amado Espita. Modelamiento de Fundaciones utilizando el metodo de los elementos finitos 3D. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Industrial De Santander. Facultad de Ingenierías Fisico-Mecanicas Escuela de Ingeniería Civil.2012

Cohesión (c): La cohesión tiene dimensiones de esfuerzo. El criterio de Mohr coulomb muestra la relación con el esfuerzo cortante del suelo, porque en si la cohesión se puede considerar como la resistencia adicional que presentan los suelos. Plaxis no puede manejar cohesiones $c=0$, y ara estos casos se debe introducir un valor pequeño este parámetro $c=0,01$ es una buena aproximación.

Angulo de fricción (ϕ): El Angulo de fricción determina en gran medida la resistencia al corte por medio de los círculos de Mohr.

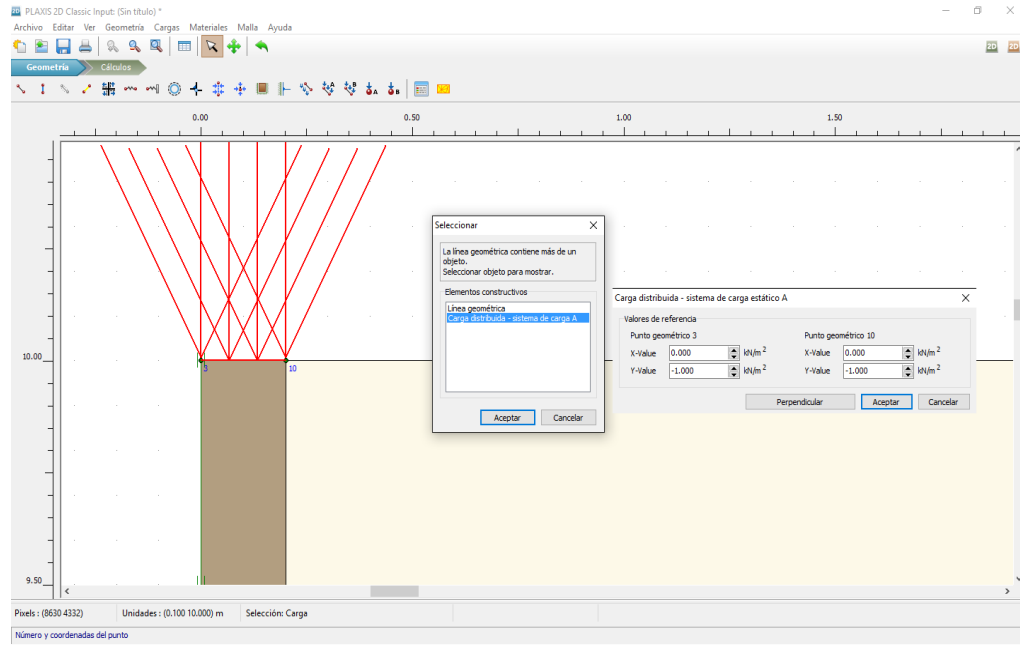
Angulo Dilatación (ψ): Se utiliza en suelos sobre consolidados, los suelos arcillosos tienden a no presentar dilatación es decir $\psi=0$.

Parámetros avanzados: Si se utiliza el modelo de Mohr-Coulomb, los parámetros que se deben modificar son los de aumento de rigidez.

El coeficiente de Poisson (ν): Este coeficiente se puede definir como la relación de deformaciones al eje de aplicación de la carga.

Permeabilidad (K): este parámetro fue dado por el director del proyecto: $K= 1 \times 10^5$ cm/seg

Figura 2. Parámetros generales: rigidez, resistencia y de flujo



5.2.2 Ingreso de datos al software

Figura 3. Asignación de carga

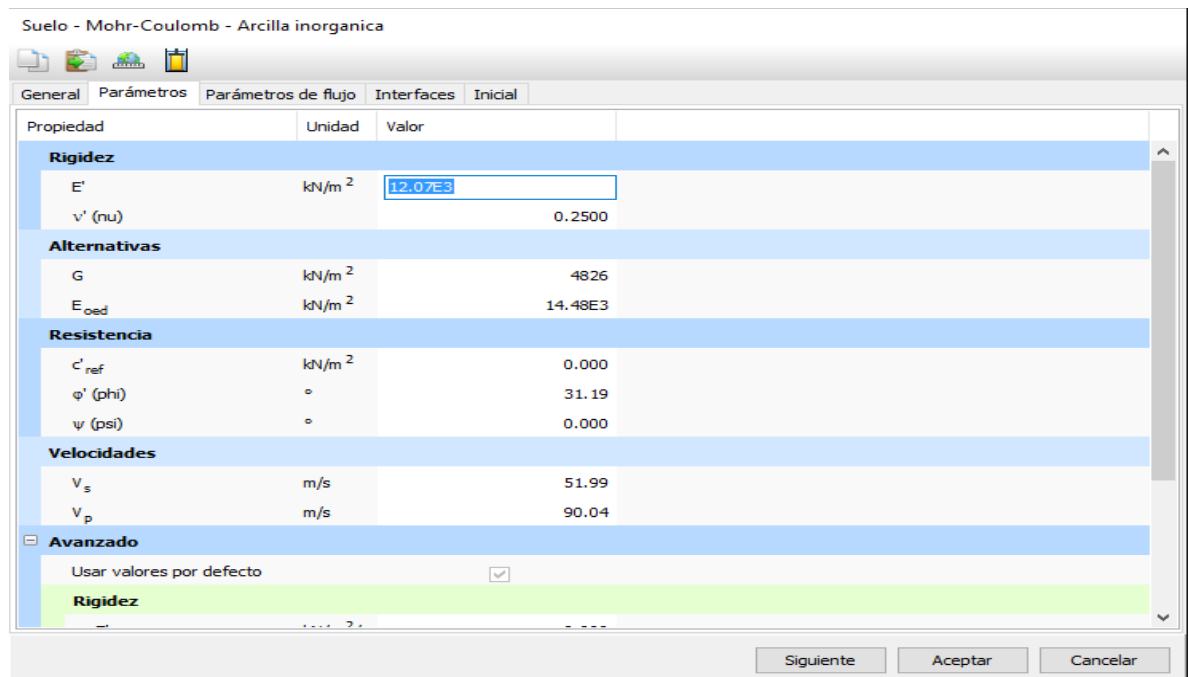
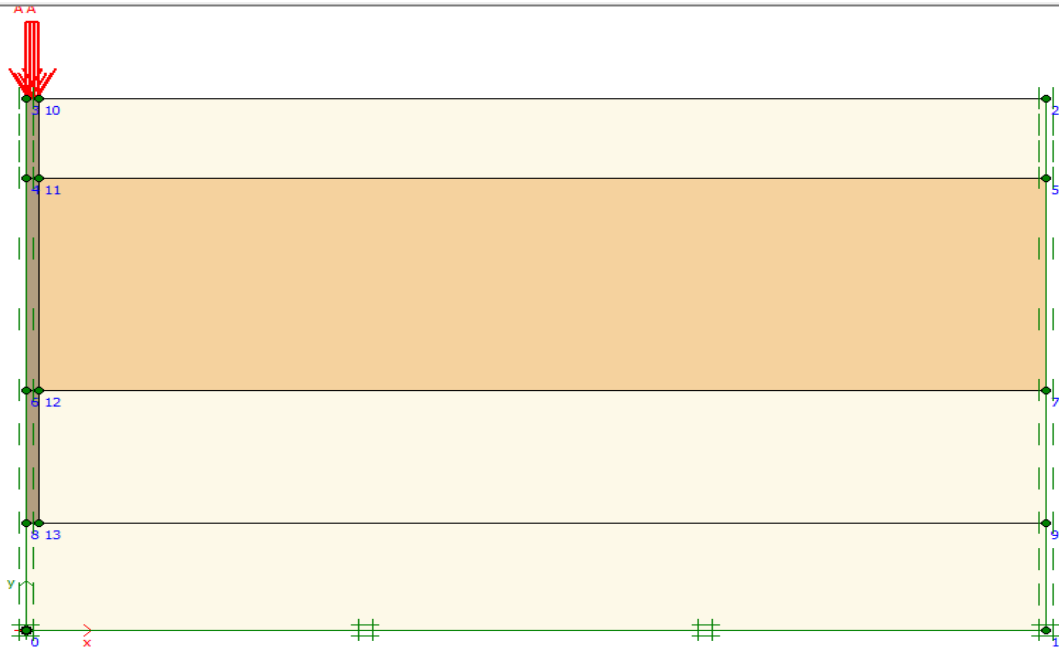


Figura 4. Perfil estratigráfico, aplicación de la carga



5.3 RESULTADOS

Figura 5. Malla deformada

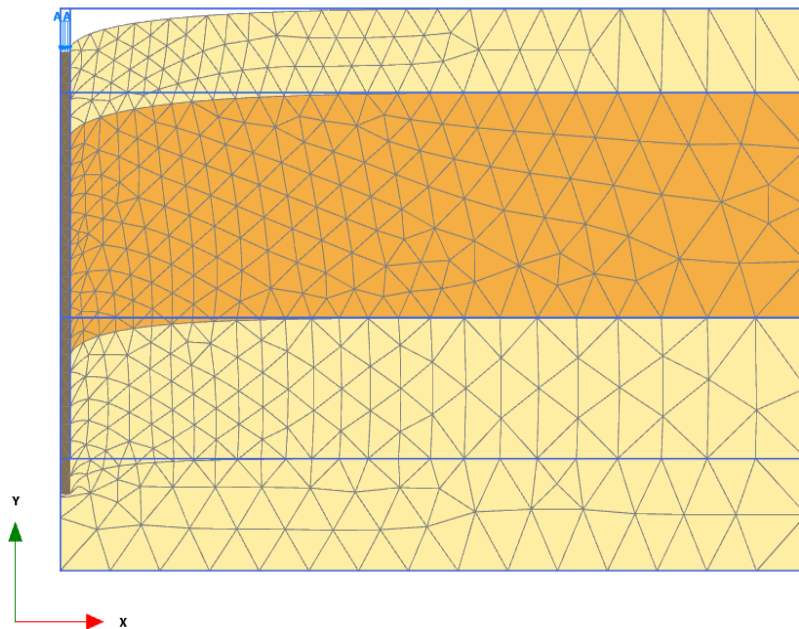


Figura 6. Esfuerzo vs Deformación

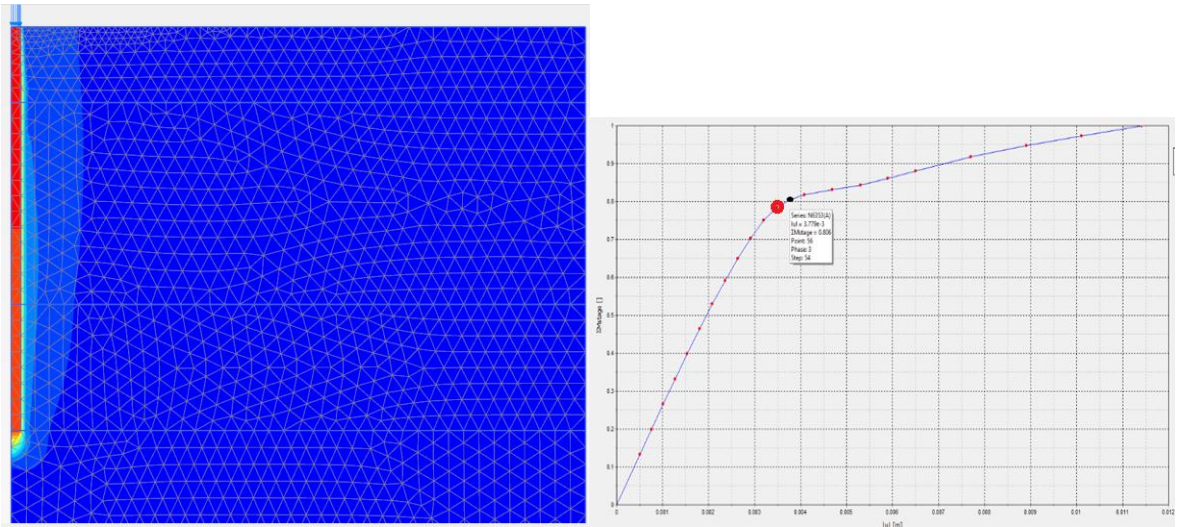


Tabla 4. Resultado obtenido con el software Plaxis 2D

Radio_Pilote	0,2	m
Area_pilote	0,125664	m ²
Carga (colocada)	3500	ton/m ²
Carga total (colocada)	439,823	ton
Limite(Figura 6. esfuerzo vs	0,77	
Resultado-programa	2695	ton/m ²
Carga real	338,6637	ton
	3322,291	kN

6. COMPARACION DE RESULTADOS

Una vez realizado el modelo por los distintos métodos, notamos diferencias en los resultados obtenidos por cada una de las metodologías. Para ver los cálculos realizados por los métodos analíticos están en anexos.

Tabla 5. Resultados obtenidos por los métodos

Metodo	Capacidad		Qu= Qp+Qs
	Por punta (KN)	Por friccion (KN)	
Meyerhof(granulares)	226,688	213,902	480,171
Poulos y Davis	1.442,480	566,193	2.008,673
Meyerhof= f(N)	926,192	515,450	1.441,641
Plaxis 2D	3322,2907		

6.1 RESUMEN DE LA APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS ANALÍTICOS Y SUS PARÁMETROS

Meyerhof: Es utilizable en arenas y arcillas, pero es más recomendable para suelos granulares, especialmente homogéneos.¹¹

Parámetros alisados: Angulo de fricción, peso unitario, coeficiente de presión lateral, factores de capacidad de carga, longitud pilote, área del pilote, diámetro del pilote.

Poulos y Davis: Metodo aplicable en suelos granulares y finos.¹²

Parámetros utilizados: Angulo de fricción suelo-pilote, peso unitario, cohesión, factores de capacidad de carga, área del pilote, perímetro del pilote.

¹¹ Principios de . Braja M. Das Cimentaciones. Cuarta edición. Año de referencia 1976

¹² Yelenith Vitalia Becerra Pinto y Joaquín Dario Gómez Delgado. Estado del arte en el análisis y procesos constructivos de cimentaciones profundas. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Industrial De Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingeniería Civil. 2009. Año de referencia 1980

Meyerhof (f(N)): Método exclusivo para pilotes en arenas conocidos los valores de penetración estándar.¹³

Parámetros utilizados: Numero de penetración estándar corregido, área de punta del pilote, perímetro del pilote, longitud del pilote

¹³ Principios de Ingeniería. Braja M. Das Cimentaciones. Cuarta edición. Año de referencia 1976

7. CONCLUSIONES

- ❖ Basados en los resultados obtenidos con distintos métodos de análisis, se evidencia diferencia en la capacidad por punta y fricción, dado que para algunos de estos métodos no requieren en su totalidad de parámetros, los cuales hacen más vulnerables sus resultados.
- ❖ Con el método de los elementos finitos puede llegar hacer un análisis más detallado sin embargo se requiere de más parámetros para llevar a cabo dicho cálculo, y en este caso se aumentaría costos de ensayos. Para el modelo utilizado en este trabajo algunos de ellos fueron encontrados en literatura especializada, especialmente en lo referente a los coeficientes de Poisson y módulos de elasticidad.
- ❖ Este análisis se realizó con el fin de dar a conocer, con cuales herramientas contamos a la hora de hacer un cálculo en la capacidad portante en pilotes, teniendo presente que la responsabilidad es del analista para escoger que método es más apropiado para el análisis del problema. En este análisis los datos de salida del modelo no representan la verdad absoluta; se tiene una infinidad de factores que no se incluyen.
- ❖ Se observó que la capacidad de carga por fricción del método de Poulos y Davis con el método de Meyerhof $f(N)$ tienen una diferencia muy leve, se podría decir que estos dos métodos tienen menor porcentaje de error y su capacidad está en ese rango.

8. RECOMENDACIONES

Hacer un ejercicio más completo donde se halla hecho prueba de carga, esto con el fin de determinar con mayor precisión la capacidad portante del pilote.

Para el método de Meyerhof (granulares) se recomienda tener cuidado en su aplicación debido a su condicional de resistencia de punta limite.

BIBLIOGRAFIA

Ana María López Rovira y Juan Sebastián Murcia Plaza. Desarrollo de un Programa De Diseño Geotécnico de Pilotes en arenas y arcillas con carga axial empleando Métodos de Análisis Basados en Confiabilidad. [Tesis] Universidad Pontificia Javeriana. Bogotá, Colombia, Julio 2014

Braja M.Das ,Principios de Ingenieria de Cimentaciones,Cimentaciones con pilotes 1999 pp 564-643

Braja M.Das Fundamentos de Ingenieria geotécnica, Cimentaciones profundas,Pilotes y pilas perforadas 2013 pp 478-563

Cristian Fernando Almeida Velandia y Miguel Angel Amado Espita. Modelamiento de Fundaciones utilizando el metodo de los elementos finitos 3D. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Industrial De Santander. Facultad de Ingenierías Fisico-Mecanicas Escuela de Ingeniería Civil.2012

Diana marcela Palacios valencia y Malory Rojas Castellanos.Evaluacion del comportamiento de pilotes mediante la técnica de elementos finitos: Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Industrial De Santander. Facultad de Ingenierías Fisico-Mecanicas Escuela de Ingeniería Civil.2012

El pilotaje. Monografía sobre cimentaciones sobre pilotes. Dr. Ing. Luis Orlando Ibañez Mora <http://www.ilustrados.com/tema/10084/Pilotaje.html>.Descargar documento [http://www.ilustrados.com/documentos/eb-E1% 20pilotaje](http://www.ilustrados.com/documentos/eb-E1%20pilotaje). [citado 5 de septiembre de 2015]

Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con spt.
<http://www.scg.org.co/wp-content/uploads/ESTIMATIVOS-DE-PARAMETROS-DE-RESISTENCIA-CON-SPT.pdf>. citado 10 de agosto 2015]

<http://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/15050?mode=full>

KARK TERZAGHI. RALPH B. PECK, Mecanica de Suelos en la Ingenieria Practica, Fundaciones 1973 pp. 267-553.

Manual de Diseño de Cimentaciones Superficiales y Profundas para Carreteras.
Capitulo 7 2012

Manual de Referencia Plaxis 2D. <http://www.plaxis.nl/files/files/2D-2-Reference.pdf>. [citado 10 de septiembre de 2015]

Principios de Braja M. Das Cimentaciones. Cuarta edición. Año de referencia 1976

Principios de Ingeniería. Braja M. Das Cimentaciones. Cuarta edición. Año de referencia 1976

Yelenith Vitalia Becerra Pinto y Joaquín Dario Gómez Delgado. Estado del arte en el análisis y procesos constructivos de cimentaciones profundas. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Industrial De Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingeniería Civil. 2009

Yelenith Vitalia Becerra Pinto y Joaquín Dario Gómez Delgado. Estado del arte en el análisis y procesos constructivos de cimentaciones profundas. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Industrial De Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingeniería Civil. 2009. Año de referencia 1980

ANEXOS

ANEXO A. VALORES OBTENIDOS PARA: MÓDULO DE ELASTICIDAD, COEFICIENTE DE POISSON

Suelo	N	PROM	$E_s = 766 N_F$	
			$E_s = 766 N_F \frac{kN}{m^2}$	ν
SC	19	15	11490	0,3
	14			
	12			
CL	13	15,75	12064,5	0,25
	9			
	10			
	11			
	17			
	19			
	18			
	29			
SC	45	40,2	30793,2	0,3
	36			
	39			
	39			
	42			
SC	46	48	36768	0,3
	46			
	50			
	50			

Tabla 4 valores típicos de poisson Barkan 1962

Tipo de suelo	modulo ν
Arcilla saturada	0,5
Arcilla con arena y limo	0,3-0,42
Arcilla no saturada	0,35-0,4
Suelo arenoso	0,15-0,25
Arenas	0,3-0,35

Diseño de cimientos-UIS 1980 Jaime Suarez Días

Tipo de suelo	Coefficiente de Poisson , ν
Arcilla saturada	0,4-0,5
Arcilla no saturada	0,1-0,3
Arcilla arenosa	0,2-0,3
Limo	0,3-0,35
Arena, arena gravosa	0,1-1,0 ^a
Roca	0,1-0,4 ^b
Loess	0,1-0,3
Hielo	0,36
Concreto	0,15

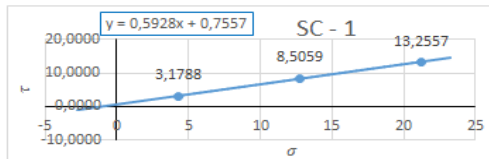
^aValor comúnmente usado 0,3-0,4
^b Es dependiente del tipo de roca

ANEXO B. CALCULO DEL ESFUERZO

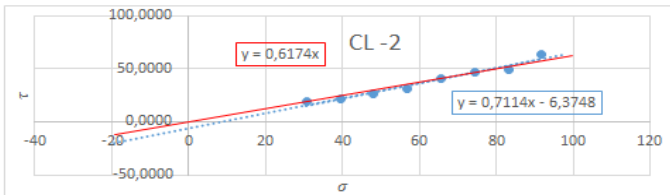
tipo suelo	profundidad (m)		prof media	N	$\gamma \left(\frac{kN}{m^3} \right)$	$\sigma_v \left(\frac{kN}{m^2} \right)$
SC	0	0,5	0,25	19	17	4,25
	0,5	1	0,75	14	17	12,75
	1	1,5	1,25	12	17	21,25
CL	1,5	2	1,75	13	17,5	30,625
	2	2,5	2,25	9	17,5	39,375
	2,5	3	2,75	10	17,5	48,125
	3	3,5	3,25	11	17,5	56,875
	3,5	4	3,75	17	17,5	65,625
	4	4,5	4,25	19	17,5	74,375
	4,5	5	4,75	18	17,5	83,125
SC	5,5	6	5,75	45	18	103,5
	6	6,5	6,25	36	18	112,5
	6,5	7	6,75	39	18	121,5
	7	7,5	7,25	39	18	130,5
	7,5	8	7,75	42	18	139,5
SC	8	8,5	8,25	46	18,5	152,625
	8,5	9	8,75	46	18,5	161,875
	9	9,5	9,25	50	18,5	171,125
	9,5	10	9,75	50	18,5	180,375

ANEXO C. CÁLCULOS PARA DETERMINAR ÁNGULOS DE FRICCIÓN Y LA COHESIÓN

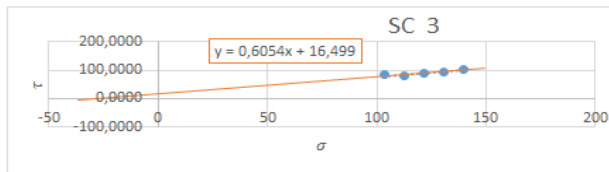
tipo suelo	profundidad (m)	prof media	N	$\gamma \left(\frac{kN}{m^3} \right)$	$\sigma \left(\frac{kN}{m^2} \right)$	atm $\left(\frac{kN}{m^2} \right)$	$R_s \left(\frac{\sigma}{p_u} \right)$	$Cn = 1 - K \cdot \log(Rs)$		N corr	$\varphi' \text{ eq}$	τ	$\sigma \left(\frac{kN}{m^2} \right)$
								K	Cn				
SC	0	0,5	19	17	4,25	101,325	0,0419	1,41	2,00	38,00	36,79449	3,1788	4,25
	0,5	1	14	17	12,75	101,325	0,1258	1,41	2,00	28,00	33,70829	8,5059	12,75
	1	1,5	12	17	21,25	101,325	0,2097	1,41	1,96	23,00	31,95582	13,2557	21,25
CL	1,5	2	13	17,5	30,625	101,325	0,3022	1,41	1,73	23,00	31,95582	19,1038	30,625
	2	2,5	9	17,5	39,375	101,325	0,3886	1,41	1,58	14,00	28,22876	21,1381	39,375
	2,5	3	10	17,5	48,125	101,325	0,4750	1,41	1,46	15,00	28,69306	26,3401	48,125
	3	3,5	11	17,5	56,875	101,325	0,5613	1,41	1,35	15,00	28,69306	31,1292	56,875
	3,5	4	17	17,5	65,625	101,325	0,6477	1,41	1,27	22,00	31,58312	40,3461	65,625
	4	4,5	19	17,5	74,375	101,325	0,7340	1,41	1,19	23,00	31,95582	46,3950	74,375
	4,5	5	18	17,5	83,125	101,325	0,8204	1,41	1,12	20,00	30,81139	49,5748	83,125
SC	5,5	6	45	18	103,5	101,325	1,0215	0,92	0,99	45,00	38,71708	82,9698	103,5
	6	6,5	36	18	112,5	101,325	1,1103	0,92	0,96	34,00	35,61553	80,5882	112,5
	6,5	7	39	18	121,5	101,325	1,1991	0,92	0,93	36,00	36,21320	88,9676	121,5
	7	7,5	39	18	130,5	101,325	1,2879	0,92	0,90	35,00	35,91650	94,5235	130,5
	7,5	8	42	18	139,5	101,325	1,3768	0,92	0,87	37,00	36,50581	103,2465	139,5
SC	8	8,5	46	18,5	152,625	101,325	1,5063	0,92	0,84	38,00	36,79449	114,1552	152,625
	8,5	9	46	18,5	161,875	101,325	1,5976	0,92	0,81	37,00	36,50581	119,8066	161,875
	9	9,5	50	18,5	171,125	101,325	1,6889	0,92	0,79	40,00	37,36068	130,6490	171,125
	9,5	10	50	18,5	180,375	101,325	1,7802	0,92	0,77	38,00	36,79449	134,9107	180,375



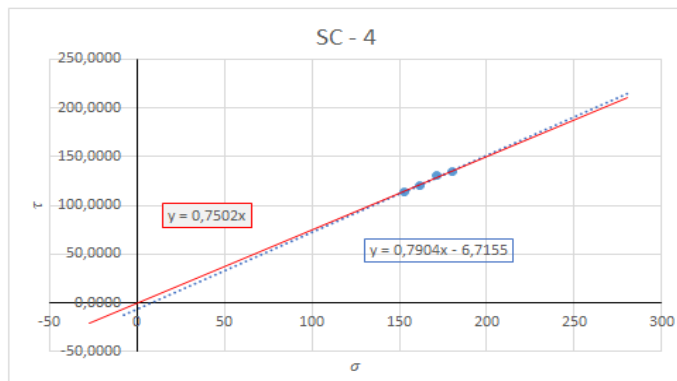
c =	0,7557
mx =	0,5928
$\phi' =$	30,6594622



c =	0
mx =	0,6174
$\phi' =$	31,691182



c =	16,499
mx =	0,6054
$\phi' =$	31,1907126



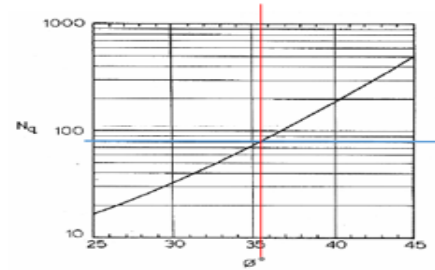
c =	0
mx =	0,7502
$\phi' =$	36,8772308

ANEXO D. MÉTODOS ANALÍTICOS - MÉTODO DE POULOS Y DAVIS

Corrección de ϕ para hallar el valor y N_q

$$\text{Para pilotes hincados: } \phi = \frac{\phi_1 + 40}{2} = \frac{31 + 40}{2} = 35.5$$

de la grafica $\rightarrow N_q = 80$



$$\sigma'_{vb} = \gamma * \Delta z = 17 \frac{kN}{m^3} * 1.5m = 25.5 \frac{kN}{m^2}$$

$$Q_u = \int_0^L P(\sigma'_{vb} k_s \tan \phi_\alpha) dz$$

$$Q_u = \int_0^{1.5} 1.26 \left(\frac{25.5}{2} * 1.26 \right) dz = 30.363 \text{ kN}$$

Para arenas

$$Q_u = A_p \sigma'_{vb} N_q + \int_0^L P(\sigma'_{vb} k_s \tan \phi_\alpha) dz$$

Diámetro del pilote = 0.4m Angulo de fricción del primer estrato = 31

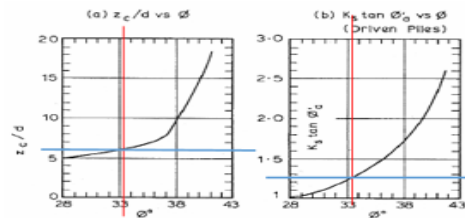
$$\text{Perímetro} = 2\pi r = \frac{2}{5} \pi = 1.26 \text{ m}$$

Corrección ϕ para hallar los valores de $\frac{z_c}{d}$ y $k_s \tan \phi_\alpha$

$$\text{Para pilotes hincado} = \phi = \frac{3}{4}(\phi_1) + 10 = 33.25$$

$k_s \tan \phi_\alpha \rightarrow$ grafica $\rightarrow 1.26$

$$\frac{z_c}{d} = 6 \rightarrow z_c = 2.4$$



Para arcilla Drenada

Para esta condición se asume $c=0$ y la ecuación queda a:

$$Q_u = A_p \sigma'_{vb} N_q + \int_0^L P(\sigma'_{vb} k_s \tan \phi_\alpha) dz$$

$c=0$, ángulo de fricción = 32

$$k_s \tan \phi_\alpha = \beta \rightarrow \beta = (1 - \sin \phi) \tan \phi \quad \beta = (1 - \sin 32) \tan 32 = 0.294$$

$$\sigma'_{vb} = \gamma_1 * \Delta z_1 + \gamma_2 * \Delta z_2 = 17 \frac{kN}{m^3} * 1.5m + 17.5 \frac{kN}{m^3} * 4m = 95.5 \frac{kN}{m^2}$$

$$\sigma'_{-vb} = \frac{25.5 \frac{kN}{m^2} + 95.5 \frac{kN}{m^2}}{2} = 60.5 \frac{kN}{m^2}$$

$$Q_u = \int_0^L P(\sigma'_{-vb} k_s \tan \phi_\alpha) dz$$

Para arena

$$Q_u = A_p \sigma'_{vb} N_q + \int_0^L P(\sigma'_{vb} k_s \tan \phi_a) dz$$

Diámetro del pilote = 0.4m Angulo de fricción del tercer estrato = 31

$$\text{Perímetro} = 2\pi r = \frac{2}{5} \pi = 1.26 \text{ m}$$

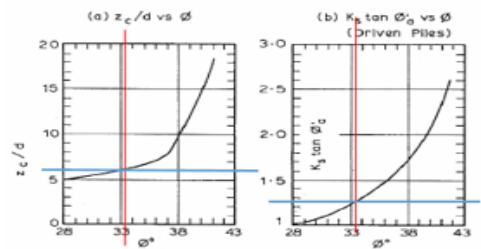
$$A_p = \pi * r^2 = 0.13 \text{ m}^2$$

Corrección ϕ para hallar los valores de $\frac{z_c}{d}$ y $k_s \tan \phi_a$

$$\text{Para pilotes hincado} = \phi = \frac{3}{4}(\phi_1) + 10 = 33.25$$

$$k_s \tan \phi_a \rightarrow \text{grafica} \rightarrow 1.26$$

$$\frac{z_c}{d} = 6 \rightarrow z_c = 2.4$$



Corrección de ϕ para hallar el valor y N_q

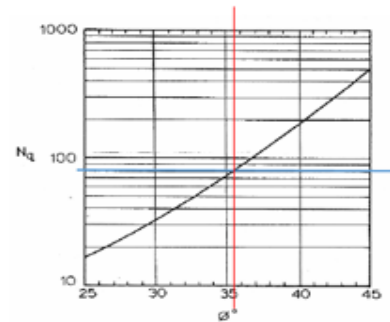
$$\text{Para pilotes hincados: } \phi = \frac{\phi_1 + 40}{2} = \frac{31 + 40}{2} = 35.5$$

$$\text{de la grafica} \rightarrow N_q = 80$$

$$\begin{aligned} \sigma'_{vb} &= \gamma_1 * \Delta z_1 + \gamma_2 * \Delta z_2 + \gamma_3 * \Delta z_3 = \\ &= 17 \frac{kN}{m^3} * 1.5m + 17.5 \frac{kN}{m^3} * 4m + 18 \frac{kN}{m^3} * 2.4m = \\ &= 138.7 \frac{kN}{m^2} \end{aligned}$$

$$\sigma'_{-vb} = \frac{95.5 \frac{kN}{m^2} + 138.7 \frac{kN}{m^2}}{2} = 117.1 \frac{kN}{m^2}$$

$$Q_u = \int_0^L P(\sigma'_{-vb} k_s \tan \phi_a) dz$$



$$Q_u = \int_{1.5}^{5.5} 1.26(60.5 * 0.294) dz = 89.65 \text{ kN}$$

$$Q_u = \int_{5.5}^{7.9} 1.26(117.1 * 1.26) dz = 446.18 \text{ kN}$$

Aporte por punta

$$A_p \sigma'_{vb} N_q = 0.13 * 138.7 * 80 = 1442.48 \text{ kN}$$

Estimación Capacidad de un pilote $Q_u = Q_s + Q_p$

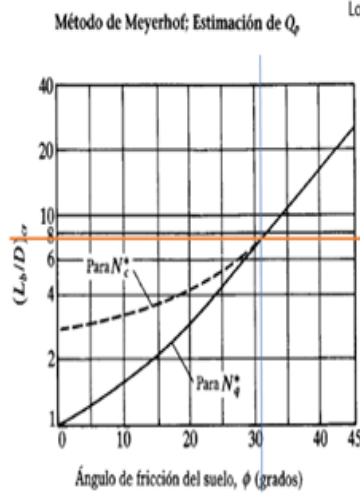
$$Q_u = 30.363 \text{ kN} + 89.65 \text{ kN} + 446.18 + 1442.48 \text{ kN} = 2008.67 \text{ KN}$$

ANEXO E. MÉTODOS ANALÍTICOS - MÉTODO DE MEYERHOF. F(N)

METODO DE MEYERHOF f(N)

profundidad	N1	N1_60
4	22	16,5
4,5	23	17,25
5	20	15
5,5	31	23,25
6	45	33,75
6,5	34	25,5
7	36	27
7,5	35	26,25
8	37	27,75
8,5	38	28,5
9	37	27,75
9,5	40	30

N₆₀ = 24.875



Variación de $(L_p/D)_{cor}$ con el ángulo de fricción del suelo (según Meyerhof, 1976)

Longitud de empotramiento en el estrato 8 m

Area 0.125663706 m²
Diametro pilote 0.4 m

$\phi = 31.19$

$(\frac{L_p}{D})_{cor} = 7.4$

N_{corr} 24.9

$$q_s \text{ (kN/m}^2\text{)} = 40N_{corr}L_p/D \leq 400N_{corr}$$

$$q_p \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 7370.4 < 9960$$

$Q_p = 926.19178 \text{ kN}$

Método de Meyerhof f(N) estimación por Q_s

$$Q_s = pL f_{prom} \quad f_{prom} = (KN/m^2) = 2 \bar{N}_{cor}$$

Donde \bar{N}_{cor} = valor corregido de la resistencia a la penetración estándar.
Aproximadamente $10D$ arriba y $4D$ debajo de la punta del pilote.

tipo suelo	profundidad (m)	N	NI	N corr	$f_{prom} = \frac{kN}{m^2}$	Area Pilote (m2)	Perimetro (m)	Qs (kN)
SC	0 0,5	19	38,00	28,50	57,00	0,13	1,26	35,81
	0,5 1	14	28,00	21,00	42,00			52,78
	1 1,5	12	23,00	17,25	34,50			65,03
CL	1,5 2	13	23,00	17,25	34,50	0,13	1,26	86,71
	2 2,5	9	14,00	10,50	21,00			65,97
	2,5 3	10	15,00	11,25	22,50			84,82
	3 3,5	11	15,00	11,25	22,50			98,96
	3,5 4	17	22,00	16,50	33,00			165,88
	4 4,5	19	23,00	17,25	34,50			195,09
	4,5 5	18	20,00	15,00	30,00			188,50
5 5,5	29	31,00	23,25	46,50	321,38			
SC	5,5 6	45	45,00	33,75	67,50	0,13	1,26	508,94
	6 6,5	36	34,00	25,50	51,00			416,58
	6,5 7	39	36,00	27,00	54,00			475,01
	7 7,5	39	35,00	26,25	52,50			494,80
	7,5 8	42	37,00	27,75	55,50			557,95
SC	8 8,5	46	38,00	28,50	57,00	0,13	1,26	7,16
	8,5 9	46	37,00	27,75	55,50			6,97
	9 9,5	50	40,00	30,00	60,00			7,54
	9,5 10	50	38,00	28,50	57,00			7,16

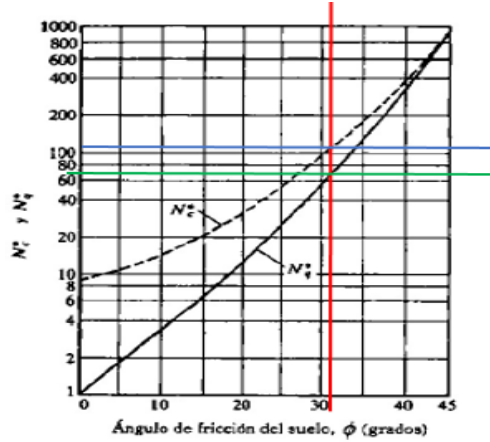
17,25
15,00
23,25
33,75
25,50
27,00
26,25
27,75
28,50
27,75
30,00

N corr_prom	25,64
f_prom	51,272727 kN/m2
perimetro	1,2566371 m
Longitud	8 m
Qs=	515,44967 kN

Resultado por Meyerhof f(N) $Q_s = 926.19 + 515.45 = 1441.64 \text{ kN}$

ANEXO F. MÉTODOS ANALÍTICOS - METODO MEYERHOF (Granulares)

METODO MEYERHOF (Granulares) Q_p



$\phi =$	31.19
A_p	0.12566371 m ²
q'	144 kN/m ³
N^*q	70

$$Q_p = A_p q' N_q \longrightarrow 1266.69016 \text{ kN}$$

$$Q_p = A_p q_l \longrightarrow Q_p = 266.261352 \text{ kN}$$

$$Q_p = A_p q_b = A_p (cN_c^* + q'N_q^*)$$

MÉTODO DE MEYERHOF (granulares) Q_s

Se tienen los siguientes valores promedio recomendados para el cálculo de K:

TIPO DE PILOTE	K
Perforado	$= K_0 = 1 - \text{sen} \phi$
Hincado, de bajo desplazamiento	$= K_0 = 1 - \text{sen} \phi$ a $1.4 K_0 = 1.4(1 - \text{sen} \phi)$
Hincado, de alto desplazamiento	$= K_0 = 1 - \text{sen} \phi$ a $1.8 K_0 = 1.8(1 - \text{sen} \phi)$

$$L' = 15D$$

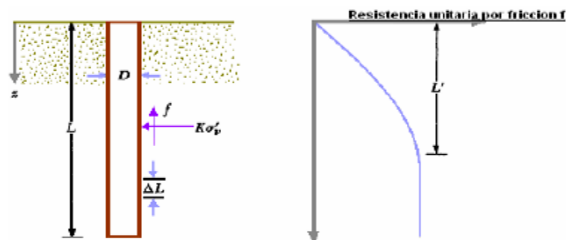
D = diámetro del pilote

- Para $z = 0$ hasta $z = L'$ $\longrightarrow f = K\sigma'_v \tan \delta$
- Para $z = L'$ hasta $z = L$ $\longrightarrow f = f_{z=L'}$

Donde K = coeficiente de presión lateral

σ'_v = esfuerzo vertical efectivo medio a la profundidad bajo consideración.

δ = ángulo de fricción entre suelo y pilote.



	γ	18 kN/m ³
longitud	profundidad	6 m
	D	0.4 m
	$\phi' =$	31.19
	$L = 15D$	6 m
	K=	0.86782012
	$\sigma'v$	54 kN/m ²
	$f = k * \sigma'v * \tan \delta$	28.3696317 kN/m ²
	perimetro	1.25663706 m
	Qs	213.901984 KN

Resultado por Meyerhof (granulares) $Q_u = Q_s + Q_p = 213.90 + 266.26 = \underline{\underline{480.16 \text{ kN}}}$