



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y
LA CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**TEMA: METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA
CAPACIDAD DE CARGA EN PILOTES, BASADO EN LA
NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN (N.E.C.)**

2015

AUTOR: QUINGA LOYA, KLEBER MAURICIO

DIRECTOR: MG. ING. BONIFAZ HUGO

SANGOLQUÍ

2017



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, ***“METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE CARGA EN PILOTES, BASADO EN LA NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN (N.E.C.) 2015”*** realizado por el señor ***Kleber Mauricio Quinga Loya***, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor ***Kleber Mauricio Quinga Loya*** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 07 de marzo de 2017

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Hugo Bonifaz', escrita sobre una línea horizontal.

Ing. Hugo Bonifaz

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Kleber Mauricio Quinga Loya**, con cédula de identidad N° 1719692848, declaro que este trabajo de titulación **"METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE CARGA EN PILOTES, BASADO EN LA NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN (N.E.C.) 2015"** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 07 de marzo de 2017

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'K. Quinga'.

Kleber Mauricio Quinga Loya

C.C. 1719692848



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, ***Kleber Mauricio Quinga Loya***, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación ***“METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE CARGA EN PILOTES, BASADO EN LA NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN (N.E.C.) 2015”*** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 07 de marzo de 2017

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Quinga Loya'.

Kleber Mauricio Quinga Loya

C.C. 1719692848

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación, se lo dedico a mis padres, Martha y Alfonso, por los valores que me han enseñado en todas las etapas de mi vida.

A mis hermanos, Darwin, Roberto, Gabriela y Nicolás, por el cariño incondicional apoyo recibido para la finalización de este trabajo.

A toda mi familia, por el apoyo moral en todas las etapas de mi vida.

Kleber Mauricio Quinga Loya

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme culminar con esta etapa importante en mi vida.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, a la carrera de ingeniería Civil a todas las personas que conocí en esta etapa, profesores y amigos.

Al Ing. Hugo Bonifaz, Ing. Byron Morales, por su apoyo en la finalización de este proyecto.

A todas las personas estuvieron presentes en la finalización de este proyecto.

Kleber Mauricio Quinga Loya

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
1. CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.1. Antecedentes.....	1
1.1.2. Área de influencia	5
1.1.3. Objetivo general del estudio	5
1.1.4. Objetivos específicos del estudio.....	5
1.1.5. Justificación e importancia.....	5
2. CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	7
2.1. Definición de pilotes.....	7
2.2. Función de los pilotes	7
2.3. Tipos de Pilotes	9
2.3.1. Clasificación de pilotes por el material	10
2.3.2. Según la forma de trabajo	13
2.3.3. Según su uso.....	14
2.4. Determinación estimada de la longitud de pilotes	15
2.4.1. Pilotes de carga de punta	15
2.4.2. Pilotes de fricción	17
2.5. Mecanismo de transferencia de carga.....	18

2.6. Ecuaciones para estimar la capacidad de un pilote.....	22
2.6.1. Capacidad de carga en punta, Q_p	23
2.6.2. Resistencia por fricción, Q_s	26
2.6.3. Carga permisible, Q_{perm}	26
3. CAPÍTULO 3: MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE CAPACIDAD DE PILOTES	27
3.1. Capacidad de carga en punta Q_p	27
3.1.1. Método de Meyerhof para Q_p	27
3.1.2. Método de Vesic para Q_p	30
3.1.3. Método de Coyle y Castello para estimar Q_p en arena	35
3.1.4. Método para calcular Q_p con resultados SPT	36
3.1.5. Método para calcular Q_p con resultados CPT	38
3.1.6. Método API.....	38
3.1.7. Método USACE (Us Army Corps of Engineers)	40
3.1.8. Método FHWA (Federal Highway Works Administration of the United States).....	41
3.2. Capacidad de carga por resistencia superficial Q_s	43
3.2.1. Capacidad de carga por fricción (Q_s) en arena ($c=0$)	44
3.2.2. Método α	47
3.2.3. Método λ	51
3.2.4. Método β	53
3.2.5. Resistencia por fricción por medio de resultados de SPT.....	55
3.2.6. Resistencia por fricción por medio de resultados de CPT.....	56
3.2.7. Método API.....	58
3.2.8. Método USACE (Us Army Corps of Engineers)	60
3.2.9. Método FHWA (Federal Highway Works Administration of the United States).....	61
3.3. Capacidad de carga para grupos de pilotes	62
3.3.1. Eficiencia de grupo de pilotes.....	65
3.3.2. Capacidad de carga en grupo de pilotes en arena ($c=0$).....	69
3.3.3. Capacidad de carga en grupo de pilotes en arcilla ($\phi = 0$).....	70

3.4. Asentamientos en pilotes.....	72
3.4.1. Asentamiento elástico en pilotes.....	72
4. CAPÍTULO 4: Ejemplo de cálculo.....	75
4.1. Detalle de ejemplos prácticos.....	75
4.1.1. Descripción de datos recolectados.....	75
4.1.2. Aplicación de métodos de calculo.....	76
5. CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	98
5.1. Conclusiones y recomendaciones.....	98
5.2. Bibliografía.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores de Nq^* con base en la teoría de Meyerhof	29
Tabla 2 Factores de carga $N\sigma^*$ para diversos valores de Irr y ϕ	33
Tabla 3: Variación de Nc^* con Irr para la condición $\phi=0$	34
Tabla 4 Relaciones aproximadas siguientes para Ir	35
Tabla 5 Valores de Nq en el método API	40
Tabla 6 Valores promedio siguientes de K	46
Tabla 7 Valores del coeficiente	48
Tabla 8 Valore de δ , sistema suelo - pilote	49
Tabla 9 Valores de K de empuje lateral, según Mansur y Hunter	54
Tabla 10 Valores para determinar la fricción lateral en suelos no cohesivos.	60
Tabla 11 Espaciamientos mínimos en grupo de pilotes	63
Tabla 12 Método Feld para grupo de pilotes	68
Tabla 13 Detalle de sondeo	75
Tabla 14 Valores de Dr , ángulo de fricción y peso específico	77
Tabla 15 Resumen de valores de capacidad por carga en punta	85
Tabla 16 Resumen de valores de capacidad por fuste de pilotes	88
Tabla 17 Resumen de datos de la estratigrafía del anexo 1	89
Tabla 18 Resumen de capacidad de cargas por fuste y punta con diferentes metodologías	93
Tabla 19 Resumen de cargas minoradas para el ejemplo práctico 3 ...	94
Tabla 20 Capacidad de carga en pilotes individuales por grupo	96
Tabla 21 Resumen del cálculo de capacidad de carga como grupo	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Situaciones en cimentaciones piloteadas.....	4
Figura 2 Función de los pilotes.....	8
Figura 3 Pilotes de acero formados por tubos	10
Figura 4 Pilotes de acero formados por perfiles I	11
Figura 5 Pilotes de hormigón prefabricados	11
Figura 6 Pilotes de madera	12
Figura 7 Esquema de cimentaciones profundas (pilotaje).....	13
Figura 8 Tipo de pilotes según su uso.....	15
Figura 9 Pilotes de carga de punta en lecho rocoso.....	16
Figura 10 Pilotes de carga de punta en estrato duro.....	16
Figura 11 Pilotes en estratos blandos	18
Figura 12 Mecanismo de transferencia de carga de pilotes	20
Figura 13 Variación de $f(z)$ con la profundidad	21
Figura 14 Pilote con carga última	22
Figura 15 Capacidad de soporte de carga última de un pilote	23
Figura 16: Variación de la Resistencia en punta	27
Figura 17 Variación de Nq^* con ϕ'	28
Figura 18 Valores de Nq^* con L/D y el ϕ	36
Figura 19 Valores de alfa recomendados.....	42
Figura 20: Nq de diferentes autores	43
Figura 21 Resistencia por fricción unitaria.....	45
Figura 22 Variación de K con L/D	47
Figura 23 Valores del coeficiente α recomendado por la API.....	49
Figura 24 Coeficiente α para arcillas condición $\phi = 0$	50
Figura 25 Valores de λ con vs profundidad del pilote	52
Figura 26 Aplicación del método λ en un suelo estratificado.....	52
Figura 27 Variación de α' con la relación de empotramiento para pilotes en arena: penetrómetro de cono eléctrico	57
Figura 28 Variación de α' con la relación de empotramiento para pilotes en arena: penetrómetro de cono mecánico.	58

Figura 29 Zona de esfuerzos para grupo de pilotes.	63
Figura 30 Configuración típica de grupo de pilotes, a) para pilas aisladas, b) para muros de cimentación	64
Figura 31 Configuración de grupo de pilotes.	65
Figura 32 Eficiencia de grupo de pilotes, método Feld.	68
Figura 33 Grupo de pilotes en arcilla.....	71
Figura 34 N'c para grupos de pilotes en arcilla	72

RESUMEN

El presente estudio, recoge la información, metodología y formulación de diferentes autores para el cálculo de la capacidad de carga en cimentaciones profundas más conocidas en el medio como cimentaciones piloteadas por los elementos que se ocupan en este tipo de estructuras, los pilotes. Además, se pretende presentar una guía de las metodologías de cálculo propuestas en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) 2015, para la estimación de la carga en cimentaciones profundas. También se presentan ejemplos de cálculo teóricos para el mejor entendimiento de la teoría presentada y finalmente se presenta un ejemplo de cálculo con datos reales de un perfil estratigráfico, producto de un estudio de suelos que está ubicado en el cantón Palenque, provincia de Los Ríos. Para el último ejemplo de cálculo se empleó pilotes circulares barrenados de hormigón, por su utilización muy común en el medio. Los resultados obtenidos por diferentes métodos, están en toneladas y se muestran como la capacidad de carga en la punta y en el fuste del pilote.

PALABRAS CLAVE:

- CAPACIDAD DE CARGA
- CIMENTACIONES PROFUNDAS
- RESISTENCIA EN FUSTE
- RESISTENCIA EN PUNTA
- PILOTES

ABSTRACT

The present study compiles the information, methodology and formulation of different authors for the calculation of the load capacity in deep foundations better known in the middle as foundations piloted by the elements that occupy in this type of structures, the piles. In addition, it is intended to present a guide of the calculation methodologies proposed in the Ecuadorian Construction Standard (NEC) 2015, for the estimation of the load in deep foundations. We also present theoretical calculation examples for a better understanding of the presented theory and finally an example of calculation with real data of a stratigraphic profile, product of a study of soils that is located in the canton Palenque, province of Los Ríos. For the last example of calculation circular concrete drilled piles of concrete were used, because their use is very common in the medium. The results obtained by different methods, are in tons and are shown as the load capacity at the tip and in the stem of the pile.

KEYWORDS:

- LOADING CAPACITY
- DEEP FOUNDATIONS
- FUSER RESISTANCE
- RESISTANCE IN TIP
- PILOTS

CAPÍTULO I GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

Uno de los elementos básicos y más importantes en cualquier estructura son las cimentaciones, y por esta razón es imprescindible el cálculo de la capacidad de carga de las mismas, principalmente cuando por el tipo de estructura o suelo requieran que se implementen cimentaciones profundas como son las cimentaciones piloteadas.

En la sección 8 de (NEC, 2015), “Cimentaciones profundas”, trata de cimentaciones con pilotes y pilas pre barrenadas, donde la estimación de la capacidad de carga de un pilote debe ser evaluada por: la resistencia desarrollada a la punta y la fricción lateral. Además, al final de esta sección se adhiere la siguiente nota: *Las expresiones para la estimación de la capacidad de carga, estado límite de falla, y asentamientos, estado límite de servicio, presentadas en este documento no representan una condición limitante para el ingeniero geotécnico. El ingeniero geotécnico deberá también estar consciente y aplicar adicionalmente metodologías actuales (según la literatura de revistas arbitradas y libros especializados) para evaluar y analizar de los estados límite de las cimentaciones superficiales, profundas, sistemas de contención o retención, cajones, excavaciones, taludes entre otras estructuras*, la cual deja abierta la posibilidad de probar métodos que no están detallados en la norma y así poder utilizar metodologías que se adapten a la geología de las diferentes zonas del país para la estimación de la capacidad de carga en pilotes.

1.1.1. Antecedentes

Las cimentaciones piloteadas son uno de los métodos más antiguos usados por el hombre para poder resolver las dificultades cuando se construye sobre suelos blandos y de capacidad portante baja. En el siglo XIX el diseño y construcción de pilotes se basaban en métodos empíricos, y es en el año

1893 que Arthur Mellen Wellington y Rudolph Hering, publicaron: "Piles and Pile Driving", en el cual propusieron metodologías y ecuaciones para el diseño de cimentaciones profundas con pilotes. (POULOS & DAVIS, 1980)

La demanda de cimentaciones profundas con pilotes se ha incrementado en los últimos años, los cuales se diseñan con métodos empíricos y teóricos. Algunos métodos han presentado problemas que se evidencian en grandes fallas y deformaciones en las estructuras. El sobredimensionamiento es otro problema en el diseño de pilotes y es causado por la utilización de métodos empíricos basados en cálculos realizados en obras previas, en este contexto se presentan como resultado pilotes muy gruesos, largos o de pilotes en gran cantidad lo cual afecta directamente a la economía del proyecto. (POULOS & DAVIS, 1980)

Hoy en día se puede encontrar mucha información de proyectos y métodos de cálculo para estimar con precisión la capacidad de carga en cimentaciones profundas con pilotes, por esta razón se debe ordenar y clasificar para realizar ejemplos de cálculo con datos de proyectos reales para comparar los resultados y determinar que método de cálculo satisface técnica y económicamente a cualquier proyecto.

Según (VESIC, 1977), a pesar del costo, el uso de pilotes es a menudo necesario para garantizar la seguridad estructural. La siguiente lista identifica algunas de las condiciones que requieren cimentaciones de pilotes.

- 1) Cuando el estrato o estratos superiores del suelo son altamente compresibles y muy débiles para sostener las cargas transmitidas por la superestructura se usan pilotes para transmitir la carga al lecho rocoso o a una capa dura, como muestra la figura 1a. Cuando no se encuentra un lecho rocoso a una profundidad razonable debajo de la superficie del terreno los pilotes se usan para transmitir

la carga estructural gradualmente al suelo. La resistencia a la carga estructural aplicada se deriva principalmente de la resistencia a fricción desarrollada en la interfaz suelo-pilote (figura 1b).

- 2) Cuando están sometidas a fuerzas horizontales (figura 1c), las cimentaciones con pilotes resisten por flexión mientras soportan aún la carga vertical transmitida por la superestructura. Este tipo de situación se encuentra generalmente en el diseño y construcción de estructuras de retención de tierra y en la cimentación de estructuras altas que están sometidas a fuerzas grandes de viento y/o sísmicas.
- 3) En muchos casos, suelos expansivos y colapsables están presentes en el sitio de una estructura propuesta y se extienden a gran profundidad por debajo de la superficie del terreno. Los suelos expansivos se hinchan y se contraen conforme el contenido de agua crece y decrece y su presión de expansión es considerable. Si se utilizan cimentaciones superficiales en estas circunstancias, la estructura sufrirá daños considerables. Sin embargo, las cimentaciones con pilotes se consideran como una alternativa cuando éstos se extienden más allá de la zona activa de expansión y contracción (figura 1d).

Los suelos como los constituidos por loess o material geológico sedimentario eólico son de naturaleza colapsable. Cuando el contenido de agua de esos suelos aumenta, su estructura se rompe. Una disminución repentina de la relación de vacíos induce grandes asentamientos de las estructuras soportadas por cimentaciones superficiales. En tales casos, las cimentaciones con pilotes se usan con éxito si éstos se extienden hasta las capas de suelo estables.

- 4) Las cimentaciones de algunas estructuras, como torres de transmisión, plataformas en alta mar y losas de sótanos de edificios

que se construyen bajo de nivel freático, están sometidas a fuerzas de levantamiento. Algunas veces se usan pilotes para esas cimentaciones y así resistir la fuerza de levantamiento (figura 1e).

- 5) Los estribos y pilas de puentes son usualmente construidos sobre cimentaciones de pilotes para evitar la posible pérdida de capacidad de carga que una cimentación superficial sufrirá por erosión del suelo en la superficie del terreno (figura 1f).

Aunque numerosas investigaciones, tanto teóricas como experimentales, se efectuaron para predecir el comportamiento y la capacidad de carga de pilotes en suelos granulares y cohesivos, los mecanismos no han sido aun totalmente entendidos y tal vez nunca lo sean. El diseño de las cimentaciones con pilotes es considerado un "arte" en vista de las incertidumbres implícitas al trabajar con las condiciones del subsuelo. Este capítulo analiza el presente estado del arte para el diseño y análisis de cimentaciones con pilotes. (Braja M. Das, 2012)

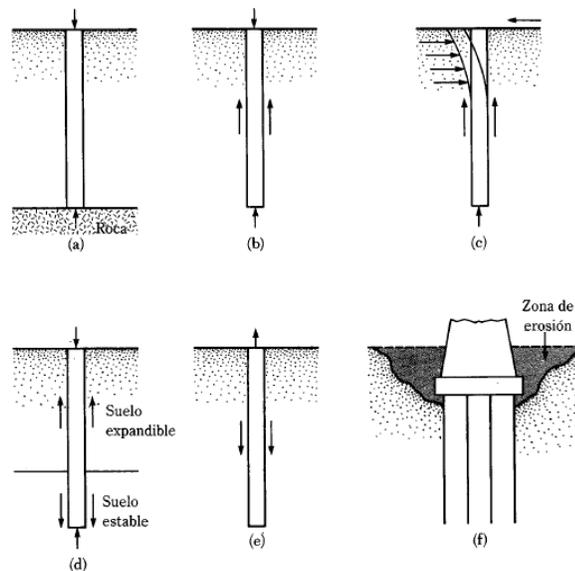


Figura 1 Situaciones en cimentaciones piloteadas

Fuente: (Braja M. Das, 2012)

1.1.2. Área de influencia

El proyecto beneficia directamente a las personas, instituciones públicas y privadas que se relacionan con el diseño de cimentaciones profundas con pilotes, ya que realizara una recopilación y ordenamiento de bibliografía y documentación para poder comparar criterios para el cálculo de capacidad de pilotes. Además, para los ejemplos de cálculo se tienen datos reales de geologías con distintos estratos en el país.

1.1.3. Objetivo general del estudio

Investigar la teoría y métodos de cálculo de la capacidad de carga de cimentaciones profundas con pilotes basándose en la Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC) 2015, para comparar resultados de ejemplos de cálculo en zonas del Ecuador.

1.1.4. Objetivos específicos del estudio

- Establecer el estado del arte en el cálculo de la capacidad de carga de Cimentaciones Profundas con pilotes para tener una línea base de investigación.
- Presentar los diferentes métodos de cálculo, ecuaciones y coeficientes para la estimación precisa de la capacidad de carga de Cimentaciones Profundas con pilotes para futuras referencias.
- Realizar ejemplos de cálculo de capacidad de carga de Cimentaciones Profundas con pilotes con datos reales y diferentes metodologías para comparar los resultados obtenidos.

1.1.5. Justificación e importancia

Se cuenta con extensa bibliografía y diferentes metodologías para la determinación de la capacidad de carga de Cimentaciones Profundas con pilotes, dejando un amplio abanico de opciones, mismas que se deben comparar y organizar para tener una adecuada metodología de cálculo.

Con la compilación y clasificación de bibliografía se tendrá una base de datos, formulas y procedimientos para determinación de la capacidad de carga de Cimentaciones Profundas con pilotes además estas definiciones se comprenderán mejor con los ejemplos de aplicación y servirán de referencia para el diseño de cimentaciones en diferentes proyectos de construcción, beneficiando a entidades públicas, privadas y a ingenieros que se dediquen al diseño de cimentaciones.

Mediante este proyecto se va a direccionar mejor el diseño de Cimentaciones Profundas con pilotes, mejorando las dimensiones, obteniendo un menor impacto ambiental ya que no se sobredimensionarán las estructuras.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1. Definición de pilotes

Según la (NEC, 2015), se conocen como cimentaciones profundas aquellas estructuras cuya cimentación cumpla con la siguiente ecuación:

$$\frac{D_f}{B} > 4$$

Donde:

D_f = profundidad de desplante

B = ancho de la cimentación

2.2. Función de los pilotes

Cuando el suelo situado al nivel en que se desplantaría normalmente una zapata o una losa de cimentación, es demasiado débil o compresible para proporcionar un soporte adecuado, las cargas se transmiten a material más adecuado a mayor profundidad por medio de pilotes o pilas. La diferencia entre estos elementos es algo arbitraria. Los pilotes son miembros estructurales con un área de sección transversal pequeña, comparada con su longitud, y usualmente se instalan utilizando una piloteadora que tiene un martinete o un vibrador. A menudo se hincan en grupos o en filas, conteniendo cada uno suficientes pilotes para soportar la carga de una sola columna o muro. Las pilas, por otra parte, tienen usualmente una sección transversal mayor, siendo cada una de ellas capaz de transmitir toda la carga de una sola columna al estrato de apoyo. (Peck, Hanson, & Thornburn, 1987)

Las columnas con poca carga pueden, en algunos casos, necesitar un solo pilote. Sin embargo, en las condiciones del trabajo de campo, la posición real de un pilote puede quedar a varios centímetros de la posición proyectada, difícilmente pueden evitarse las cargas excéntricas. En consecuencia, las

cabezas de los pilotes aislados usualmente se arriostran en dos direcciones por medio de contratrabes (fig. 2a). Si sólo se necesitan dos pilas, las cabezas se unen con un cabezal de concreto, siendo arriostradas solamente en una dirección, perpendicular a la línea que une los dos pilotes (fig. 2b). Los grupos que contienen tres o más pilotes están provistos de cabezales de concreto reforzado, como se muestra en la fig. 2c.

También pueden usarse pilotes verticales para resistir cargas laterales; por ejemplo, debajo de una alta chimenea sujeta al viento. Comparada con la capacidad axial, la capacidad lateral es usualmente pequeña. Cuando es necesario soportar grandes cargas laterales, pueden usarse pilotes inclinados (fig. 2d). (Ralph B. Peck, 1987)

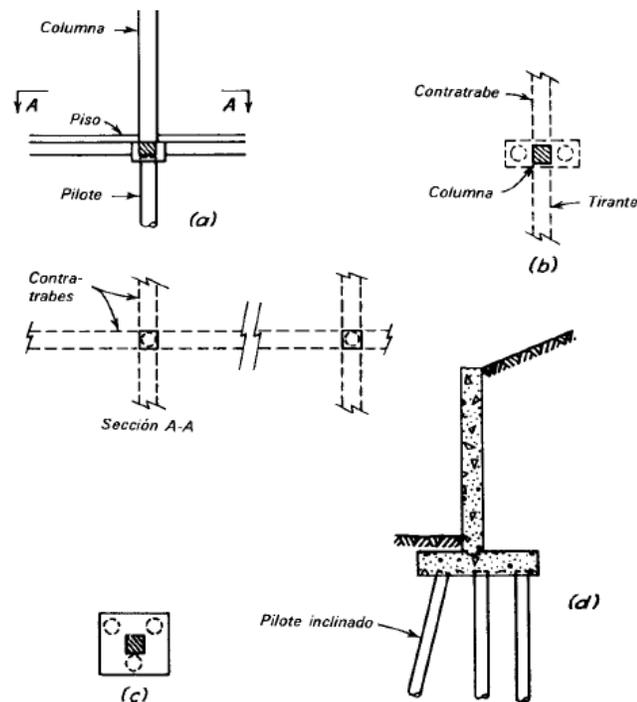


Figura 2 Función de los pilotes

Fuente: (Peck, Hanson, & Thornburn, 1987)

2.3. Tipos de Pilotes

Para la clasificación de pilotes, se debe considerar sus características físicas, materiales entre otros, como, por ejemplo: según Prakash (1990), en la mayoría de métodos, los criterios para clasificar los tipos de pilotes son:

- Material de los pilotes
- Método de fabricación de pilotes
- Cantidad de material removido durante la instalación de los pilotes
- Método de instalación de pilotes en el suelo
- Forma de transferencia de carga

También Coduto (1994), presenta una clasificación en función de las propiedades de los pilotes y dividiendo en grupos como:

- Pilotes hincados: donde se encuentran los pilotes de madera, acero, concreto y compuestos
- Pilotes preexcavados
- Pilotes vaciados con barreno
- Pilotes operados con torno
- Pilotes anclados y
- Pilotes Franki.

Una clasificación sintetizada donde se agrupen la mayoría de categorizaciones realizadas en la ingeniería de cimentaciones se debe tomar en cuenta el tipo de material de los pilotes, el funcionamiento o comportamiento de los mismos y el tipo de instalación en el suelo de cimentación.

2.3.1. Clasificación de pilotes por el material

Los pilotes se construyen en una gran variedad de tamaños, formas, y materiales para adaptarse a muchos requisitos especiales, incluyendo la competencia económica. Aunque su variedad desafía las clasificaciones sencillas, pueden estudiarse desde el punto de vista de los principales materiales de que están hechos. Que incluyen la madera, el concreto, y el acero.

2.3.1.1. Pilotes de acero

Los pilotes de acero son generalmente 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. En las vigas de patín ancho y de sección I, los espesores del alma son menores que los espesores de los patines. (Braja M. Das, 2012)



Figura 3 Pilotes de acero formados por tubos

Fuente: www.steelpipe.es



Figura 4 Pilotes de acero formados por perfiles I

Fuente: <http://codocsa.com>

2.3.1.2. Pilotes de concreto

Los pilotes de concreto se dividen en dos categorías en dos categorías: prefabricados y los vaciados en sitio. Los pilotes prefabricados generalmente tienen secciones transversales cuadradas, circulares u octagonales, se construyen usando refuerzo ordinario, además son pre-esforzados post-tensados para que los pilotes resistan el momento flexionante que se genera al transportarlo al lugar de instalación. (Braja M. Das, 2012)



Figura 5 Pilotes de hormigón prefabricados

Fuente: www.archiexpo.es

2.3.1.3. Pilotes de madera

Los pilotes de madera son troncos de árboles cuyas ramas y corteza fueron cuidadosamente recortadas. La longitud máxima de la mayoría de los pilotes de madera es de entre 30 y 65 pies (10-20 m). Para calificar como pilote, la madera debe ser recta, sana y sin defectos. Para que soporten cargas pesadas, el diámetro mínimo del fuste debe ser de 14" (356 mm), también se usan para cargas medias, pilotes de madera con el diámetro mínimo del fuste de 12" y 13" (305-330 mm). Finalmente se usan en trabajos provisionales de construcción o cuando todo el pilote está debajo del nivel freático, pilotes con diámetro mínimo del fuste de 12" (305 mm). (Braja M. Das, 2012)



Figura 6 Pilotes de madera

Fuente: maderapol.com

2.3.1.4. Pilotes compuestos

Las porciones superior e inferior de los pilotes compuestos están hechos de diferentes materiales, por ejemplo, se fabrican de acero y concreto o de madera y concreto. Los pilotes de acero y concreto consisten en una porción inferior de acero y en una porción superior de concreto colado en el lugar. Este tipo es el usado cuando la longitud del pilote requerido para un apoyo adecuado excede la capacidad de los pilotes simples de concreto colado en el lugar. Los de madera y concreto consisten en una porción inferior de pilote de madera debajo del nivel permanente del agua y en una porción superior de concreto. En cualquier caso, la formación de juntas apropiadas entre dos materiales diferentes es

difícil y por eso, los pilotes compuestos no son muy usados. (Braja M. Das, 2012)

2.3.2. Según la forma de trabajo

En cuanto a la forma de trabajo, los pilotes se clasifican en:

- Pilotes por fuste: en aquellos terrenos en los que al no existir un nivel claramente más resistente al que transmitir la carga del pilotaje, éste transmitirá su carga al terreno fundamentalmente a través del fuste. Se suelen denominar pilotes “flotantes”;
- Pilotes por punta: en aquellos terrenos en los que, al existir, a cierta profundidad, un estrato claramente más resistente, las cargas del pilotaje se transmitirán fundamentalmente por punta. Se suelen denominar pilotes “columna”. (Angel Muelas R., 2006)

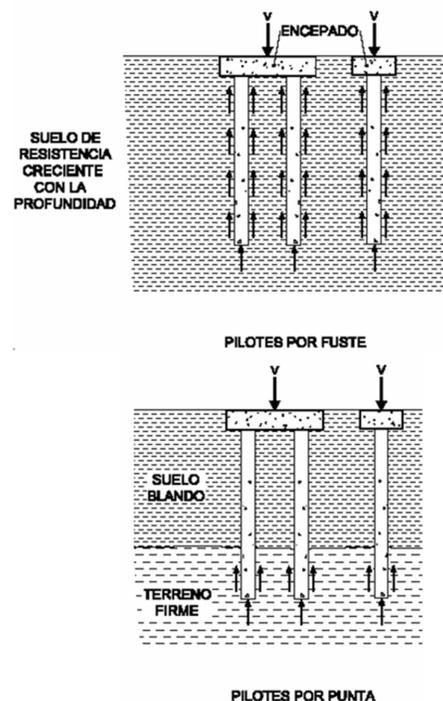


Figura 7 Esquema de cimentaciones profundas (pilotaje)

Fuente: (Angel Muelas R., 2006)

2.3.3. Según su uso

Continuación se detalla las diferentes maneras de utilización de pilotes expresadas en (Alva, 2003)

- 1) Utilización a través de estratos de suelo blandos, a través de agua o aire, hasta estratos con capacidad de soportar las cargas generadas por la estructura, así el pilote se comportará como una extensión de las columnas de la estructura.
- 2) Transferir o repartir la carga sobre un suelo relativamente suelto a través de la fricción de superficie entre el pilote y el suelo, (pilote de fricción).
- 3) En situaciones donde el suelo alrededor de un pilote lo mueve hacia abajo, a esto se le denomina "fricción negativa", esta fricción tiende a hundir el pilote y si éste no puede penetrar más, en la punta del pilote se generará una presión concentrada.
- 4) Proporcionar anclaje a estructuras sujetas a subpresiones, momentos de volteo o cualquier efecto que trate de levantar la estructura.
- 5) Alcanzar profundidades que no estén sujetas a erosión, socavaciones u otros efectos.
- 6) Evitar daños que puede producir una futura excavación a la cimentación de una edificación adyacente.
- 7) En áreas de suelos expansivos o colapsables, para asegurar que los movimientos estacionales no afectaran a la estructura.
- 8) Bowles (1997); asegura los pilotes de tracción se usan para resistir fuerzas hacia arriba, como en las estructuras sometidas a supresión; tales son los edificios cuyos basamentos están situados por debajo del nivel freático o las obras de protección de presas.

- 9) Hincados en suelos granulares para lograr una compactación apropiada de suelo cercano a la superficie del terreno (Das, 2001).

10

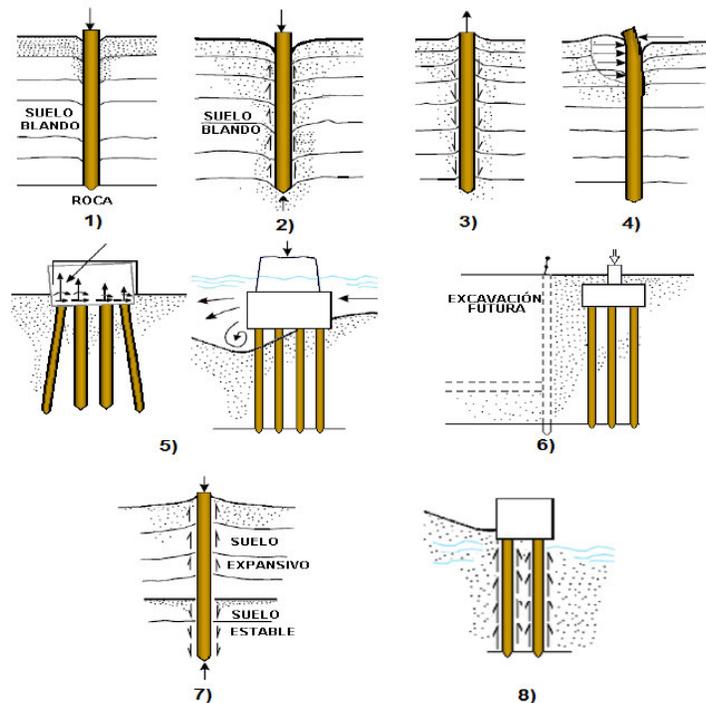


Figura 8 Tipo de pilotes según su uso

Fuente: (Alva, 2003)

2.4. Determinación estimada de la longitud de pilotes

Para seleccionar el tipo de pilote y estimar la longitud, se debe tener en cuenta la clasificación según su forma de trabajo de la sección 2.3.2 “Según la forma de trabajo” y con esta consideración, tenemos los siguientes procedimientos para determinar la longitud necesaria de un pilote.

2.4.1. Pilotes de carga de punta

Si los registros de perforación del suelo establecen la presencia de lecho de roca o de un material rocoso en un emplazamiento dentro de una profundidad razonable que no haga la construcción del pilote poco económico, la longitud del mismo se prolongará hasta los estratos mencionados. (Braja M. Das, 2012)

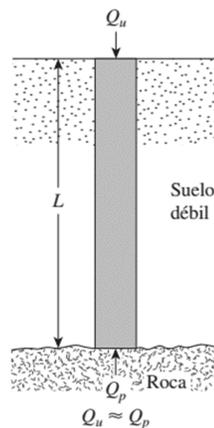


Figura 9 Pilotes de carga de punta en lecho rocoso

Fuente: (Braja M. Das, 2012)

Se puede observar claramente en este caso que la capacidad última de los pilotes depende enteramente de la capacidad de soporte de carga del material en los estratos rocosos por eso se conocen como pilotes de carga de punta.

Si en los registros de perforación no se encuentran estratos rocosos y solo se encuentra material debidamente consolidados, los pilotes se pueden prolongar unos metros en el estrato mencionado.

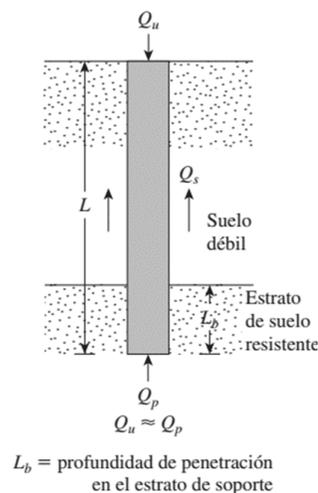


Figura 10 Pilotes de carga de punta en estrato duro

Fuente: (Braja M. Das, 2012)

Los pilotes con pedestales o pilotes acampanados, se construyen sobre el lecho del estrato duro y la carga última del pilote se expresa como:

$$Q_u = Q_p + Q_s$$

donde

Q_p = carga soportada en la punta del pilote

Q_s = carga soportada por la fricción superficial desarrollada en los lados del pilote (causada por la resistencia cortante entre el suelo y el pilote)

Si Q_s es muy pequeña,

$$Q_s \approx Q_p$$

En este caso, la longitud requerida del pilote se puede estimar con precisión si se dispone de registros apropiados de la exploración del subsuelo.

2.4.2. Pilotes de fricción

Cuando no se encuentra un estrato de roca o de un material rocoso a una profundidad razonable en un emplazamiento, los pilotes de carga de punta resultan muy largos y poco económicos. En este tipo de subsuelo, los pilotes se hincan a través del material más suave hasta las profundidades especificadas.

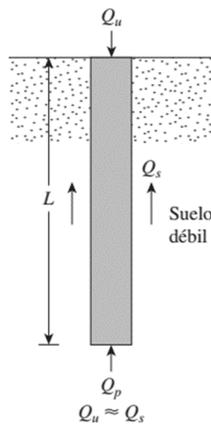


Figura 11 Pilotes en estratos blandos

Fuente: (Braja M. Das, 2012).

La carga última de los pilotes se puede expresar por la ecuación

$$Q_u = Q_p + Q_s$$

Sin embargo, si el valor de Q_p es relativamente pequeño, entonces

$$Q_u \approx Q_s$$

Estos pilotes se denominan pilotes de fricción, debido a que la mayoría de su resistencia se deriva de la fricción superficial.

La longitud de los pilotes de fricción depende de la resistencia cortante del suelo, de la carga aplicada y del tamaño del pilote. Para determinar la longitud necesaria de estos pilotes, se necesita comprender la interacción suelo – pilote.

2.5. Mecanismo de transferencia de carga

La transmisión de carga se realiza de dos maneras:

- Por la superficie lateral del pilote, transmitiendo la carga al suelo por adherencia,
- Por punta del pilote, transmitiendo la carga al estrato de apoyo por compresión.

Entonces dependiendo del tipo de transmisión de carga, se tiene los siguientes tipos de pilotes:

Pilote de fricción: estos pilotes transmiten las cargas al suelo de cimentación principalmente a lo largo de la superficie lateral o fuste del mismo. Este tipo de pilotes deben ser hincados en estratos con características mecánicas pobres, evitando que la punta se apoye en las capas resistentes subyacentes. Se utilizan cuando el estrato superficial blando tiene un espesor considerablemente mayor, haciendo poco económico la construcción de pilotes con transferencia de carga en la punta. También se utilizan este tipo cuando la consolidación de éste estrato induce fricción negativa en los pilotes de punta y provoca su emersión. (Gonzáles, 2001)

Pilotes de punta: este tipo de pilotes se construyen cuando se deben alcanzar estratos que están a una profundidad considerable, esto incluye estratos rocosos, básicamente la transferencia de carga es mediante el contacto directo de la punta del pilote con el estrato resistente. (Gonzáles, 2001)

(Braja M. Das, 2012), explica la transferencia de carga, haciendo hincapié en la complejidad del tema, entonces para comprenderlo, se debe tener en cuenta un pilote de longitud L (figura 12a).

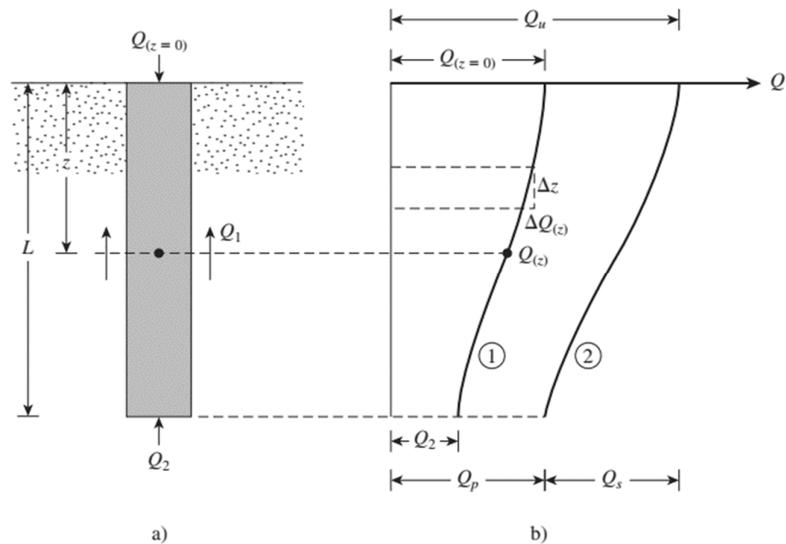


Figura 12 Mecanismo de transferencia de carga de pilotes

Fuente: (Braja M. Das, 2012).

La carga apoyada en el pilote aumentará desde cero en $Q(z=0)$ en la superficie del terreno. La carga antes mencionada la resistirá la fricción lateral que se desarrolla a lo largo del fuste del pilote, se conoce como Q_1 y parte resistirá la punta del pilote, se conocerá como Q_2 . Entonces la relación que tienen Q_1 y Q_2 se determinará de la siguiente manera: Si se realizan mediciones para determinar la carga, $Q(z)$, soportada por el fuste a lo largo del pilote, a cualquier punto z , la variación será como la curva número 1 de la figura 12b.

Ahora la resistencia por fricción por área unitaria (resistencia en el fuste) a cualquier punto o profundidad z se determinará con la función:

$$f_{(z)} = \frac{\Delta Q_{(z)}}{(p)(\Delta z)}$$

Donde

p = perímetro de la sección transversal del pilote.

En la figura 13 se muestra la variación de $f_{(z)}$ con la profundidad.

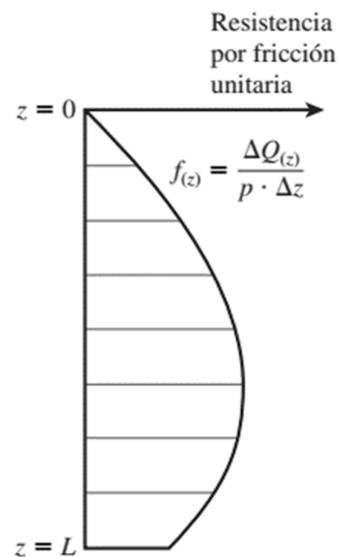


Figura 13 Variación de $f(z)$ con la profundidad

Fuente: (Braja M. Das, 2012).

Si la carga Q en la superficie del terreno, aumenta de manera gradual, la resistencia por fricción máxima a lo largo del fuste del pilote se moverá por completo cuando el desplazamiento relativo entre el suelo y el pilote sea de aproximadamente 5 a 10 mm, con independencia del tamaño y de la longitud L del pilote. Sin embargo, la resistencia máxima de punta $Q_2 = Q_p$ no se movilizará hasta que la punta del pilote se haya movido aproximadamente 10 a 25% del ancho del pilote (o diámetro). (El límite inferior se aplica a pilotes hincados y el límite superior a pilotes perforados). A carga última (figura 13 y la curva 2 en la figura 12b), $Q_{(z=0)} = Q_u$. Entonces,

$$Q_1 = Q_2$$

y

$$Q_2 = Q_p$$

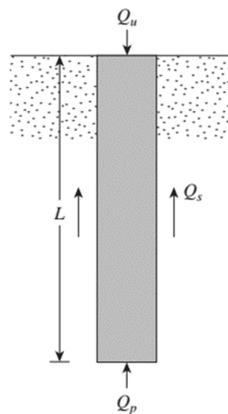


Figura 14 Pilote con carga última

Fuente: BRAJA M. DAS, 2012.

En la explicación anterior se indica que Q_s (o la fricción superficial unitaria, f , a lo largo del fuste del pilote) se desarrolla a un desplazamiento mucho menor del pilote comparado con la resistencia de punta, Q_p .

2.6. Ecuaciones para estimar la capacidad de un pilote

La capacidad de soporte de carga última Q_u de un pilote se determina por la ecuación

$$Q_u = Q_p + Q_s$$

donde

Q_p = capacidad de soporte de carga de la punta del pilote

Q_s = resistencia por fricción (fricción superficial) derivada de la interfaz suelo-pilote.

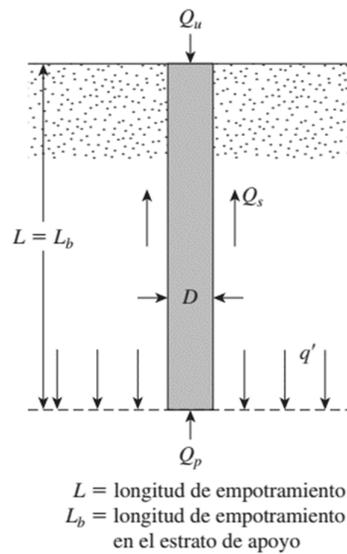


Figura 15 Capacidad de soporte de carga última de un pilote

Fuente: (Braja M. Das, 2012).

2.6.1. Capacidad de carga en punta, Q_p

(Braja M. Das, 2012), indica que según la ecuación de Terzaghi

$$q_u = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma * BN_\gamma$$

La ecuación anterior se utiliza para cimientos corridos

Donde:

c = cohesión del suelo

γ = peso específico del suelo

$q = \gamma \cdot D_f$

D_f = profundidad de desplante de la cimentación

N_c , N_q , N_γ = factores de capacidad de carga (son adimensionales y se encuentran en función del ángulo de fricción del suelo, ϕ)

$$N_c = \cot \phi (N_q - 1)$$

$$N_q = \frac{e^{2\left(\frac{3\pi}{4} - \phi - 2\right) \tan \phi}}{2 \cos^2(45 - \phi/2)}$$

$$N_\gamma = \frac{1}{2} \left(\frac{K_{p\gamma}}{\cos^2 \phi} - 1 \right) \tan \phi$$

Dónde:

$K_{p\gamma} = 3 * \tan^2 \left(45 + \frac{\phi + 33}{2} \right) =$ coeficiente de empuje pasivo (aprox. de Husain)

De acuerdo con las ecuaciones de Terzaghi, la ecuación para cimentaciones superficiales cuadradas

$$q_u = 1.3c'N_c + qN_q + 0.4\gamma BN_\gamma$$

y para cimentaciones superficiales circulares

$$q_u = 1.3c'N_c + qN_q + 0.3\gamma BN_\gamma$$

Así mismo, la ecuación general de la capacidad de carga para cimentaciones superficiales

$$q_u = c'N_c F_{cs} F_{cd} + qN_q F_{qs} F_{qd} + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d}$$

Entonces, en general, la capacidad de soporte de carga última se puede expresar como

$$q_u = c'N_c^* + qN_q^* + \gamma BN_\gamma^*$$

donde N_c^* , N_q^* y N_γ^* son los factores de capacidad de carga que incluyen los factores de forma y profundidad necesarios.

Las cimentaciones con pilotes son profundas. Sin embargo, la resistencia última por área unitaria desarrollada en la punta de un pilote, q_p , se puede expresar mediante una ecuación similar a la anterior, aunque los valores de N_c^* , N_q^* y N_γ^* cambiarán y la notación utilizada para el ancho de un pilote es D . De aquí, al sustituir D por B en la ecuación anterior da (Braja M. Das, 2012)

$$q_u = q_p = c'N_c^* + qN_q^* + \gamma DN_\gamma^*$$

Debido a que el ancho D de un pilote es relativamente pequeño, el término γDN_γ^* se puede omitir en el lado derecho de la ecuación anterior; entonces, se tiene

$$q_p = c'N_c^* + qN_q^*$$

Observe que el término q se reemplazó por q' en la ecuación anterior, para denotar el esfuerzo vertical efectivo. Por lo tanto, la capacidad de punta de los pilotes es

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

donde

A_p = área de la punta del pilote

c' = cohesión del suelo que soporta la punta del pilote

q_p = resistencia unitaria de punta

q' = esfuerzo vertical efectivo al nivel de la punta del pilote

N_c^* , N_q^* = factores de capacidad de carga.

2.6.2. Resistencia por fricción, Q_s

La resistencia por fricción, o superficial, de un pilote se puede escribir como

$$Q_s = \sum p \Delta L f$$

donde

p = perímetro de la sección del pilote

ΔL = longitud incremental del pilote sobre la cual p y f se consideran constantes

f = resistencia unitaria por fricción a cualquier profundidad z

Los diversos métodos para estimar Q_p y Q_s se analizarán en el capítulo 3 del proyecto. Es necesario enfatizar que, en el campo, para una movilización total de la resistencia de punta (Q_p), la punta del pilote debe desplazarse de 10 a 25% del ancho del pilote (o diámetro).

2.6.3. Carga permisible, Q_{perm}

Después de que se ha determinado la capacidad de soporte de carga última total sumando la capacidad de carga de punta y la resistencia por fricción (o superficial), se debe utilizar un factor de seguridad razonable para obtener la carga permisible para cada pilote, como

$$Q_{perm} = \frac{Q_u}{FS}$$

donde

Q_{perm} = capacidad de soporte de carga permisible para cada pilote

FS = factor de seguridad

El factor de seguridad utilizado en general varía de 2.5 a 4.

CAPÍTULO III

MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE CAPACIDAD DE PILOTES

3.1. Capacidad de carga en punta Q_p

3.1.1. Método de Meyerhof para Q_p

3.1.1.1. Método de Meyerhof para arenas ($c=0$)

En (Braja M. Das, 2012), se indica que la capacidad de carga de punta, q_p , de un pilote en arena con cohesión igual cero, se incrementa con la profundidad en el estrato apoyo y alcanza a su valor máximo cuando la relación:

$$L_b/D = (L_b/D)_{cr}$$

D = diámetro de la punta del pilote

En un material homogéneo L_b es igual a la longitud de empotramiento real del pilote, L (Figura 15), cuando el pilote se ha introducido en un estrato de carga, $L_b < L$. Más allá de la relación de empotramiento crítica, L_b/D , el valor de q_p permanece constante $q_p = q_l$ como se muestra en la siguiente figura:

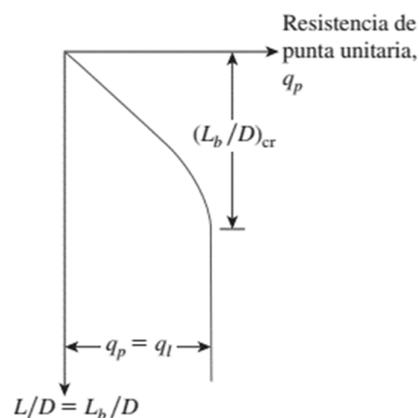


Figura 16: Variación de la Resistencia en punta

Fuente: (Braja M. Das, 2012)

Tomando en cuenta que, para pilotes en arena, la cohesión, $c = 0$ y la ecuación

$$Q_p = A_p q_p = A_p q' N_q^*$$

(Braja M. Das, 2012), indica los valores de N_q^* con el ángulo de fricción del suelo ϕ' se muestra en la figura 17, así mismo los valores interpolados en la tabla 1.

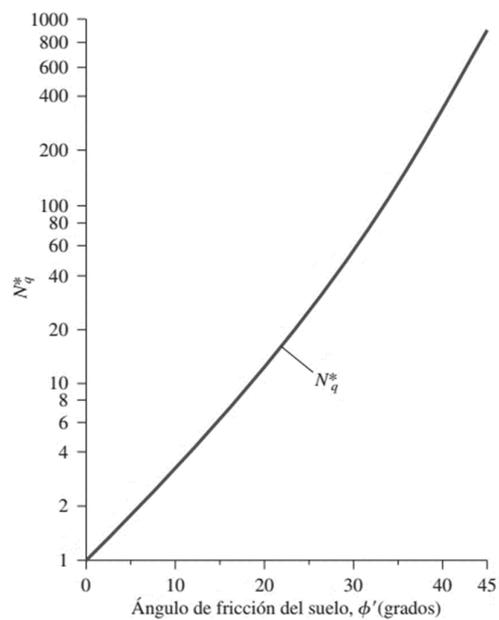


Figura 17 Variación de N_q^* con ϕ'

Fuente: (Braja M. Das, 2012)

Tabla 1

Valores interpolados de N_q^* con base en la teoría de Meyerhof

Ángulo de fricción del suelo, ϕ (grados)	N_q^*
20	12.4
21	13.8
22	15.5
23	17.9
24	21.4
25	26
26	29.5
27	34
28	39.7
29	46.5
30	56.7
31	68.2
32	81
33	96
34	115
35	143
36	168
37	194
38	231
39	276
40	346
41	420
42	525
43	650
44	780
45	930

Fuente: (Braja M. Das, 2012)

Sin embargo, Q_p no debe exceder el valor límite $A_p q_l$; es decir,

$$Q_p = A_p q' N_q^* \leq A_p q_l$$

Entonces la resistencia de punta límite es

$$q_l = 0.5 p_a N_q^* \tan \phi'$$

donde

p_a = presión atmosférica (100 kN/m²)

ϕ' = ángulo de fricción efectivo del suelo del estrato cimentación del pilote

3.1.1.2. Método de Meyerhof para arcillas ($\phi=0$)

Según, (Braja M. Das, 2012), en arcillas saturadas en condiciones no drenadas ($\phi = 0$), la carga última neta en pilotes es:

$$Q_p \approx N_c^* c_u A_p = 9 c_u A_p$$

Donde

c_u = Cohesión no drenada del suelo debajo de la punta del pilote.

3.1.2. Método de Vesic para Q_p

(Braja M. Das, 2012), explica este método en dos partes, las cuales diferencian del material que compone el estrato de apoyo.

A continuación, se revisará la metodología propuesta por Vesic, para la estimación de la capacidad de carga en punta según el suelo.

3.1.2.1. Método de Vesic para Q_p en Arena

(VESIC, 1977), propuso una metodología, para determinar la capacidad de carga de punta de un pilote, basándose en la teoría de expansión de cavidades. Basándose en las cuantificaciones del esfuerzo efectivo, se puede escribir

$$Q_p = A_p q_p = A_p \bar{\sigma}'_0 N_{\sigma}^*$$

donde

$\bar{\sigma}'_0$ = esfuerzo efectivo normal medio del suelo al nivel de la punta del pilote = $\left(\frac{1+2K_0}{3}\right) q'$

K_0 = coeficiente de presión de tierra en reposo = $1 - \sin \phi'$

N_{σ}^* = factor de capacidad de carga

La ecuación anterior es una modificación de:

$$q_p = c' N_c^* + q N_q^*$$

con

$$N_{\sigma}^* = \frac{3 N_{\sigma}^*}{(1 + 2 K_0)}$$

De acuerdo con la teoría de Vesic,

$$N_{\sigma}^* = f(I_{rr})$$

Donde

I_{rr} = índice de rigidez reducida para el suelo.

También

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta}$$

donde

$$I_r = \text{índice de rigidez} = \frac{E_s}{2(1+\mu_s) q' \tan \phi'} = \frac{G_s}{q' \tan \phi'}$$

E_s = módulo de elasticidad del suelo

μ_s = relación de Poisson del suelo

G_s = módulo de cortante del suelo

Δ = deformación unitaria volumétrica promedio en la zona plástica debajo de la punta del pilote

Los intervalos generales de I_r para varios suelos son

Arena (densidad relativa = 50 a 80%): 75 a 150; Limo: 50 a 75

Chen y Kulhawy, 1994 menciona que a fin de estimar I_r y I_{rr} se puede utilizar la aproximación siguiente

$$\frac{E_s}{P_a} = m$$

donde

P_a = presión atmosférica ($\approx 100 \text{ kN/m}^2$)

$m = 100$ a 200 (suelo suelto); 200 a 500 (suelo medio denso); 500 a 1000 (suelo denso)

$$\mu_s = 0.1 + 0.3 \left(\frac{\phi' - 25}{20} \right) \quad (\text{para } 25^\circ \leq \phi' \leq 45^\circ)$$

$$\Delta = 0.005 \left(1 - \frac{\phi' - 25}{20} \right) \frac{q'}{P_a}$$

Con base en pruebas de penetración de cono en el campo, Baldi y colaboradores (1981) dieron las correlaciones para I_r siguientes:

$$I_r = \frac{300}{F_r(\%)} \quad (\text{Para penetración de cono mecánico})$$

y

$$I_r = \frac{170}{F_r(\%)} \quad (\text{Para penetración de cono eléctrico})$$

Tabla 2

Factores de capacidad de carga N_{σ}^* para diversos valores de I_{rr} y ϕ

ϕ	Irr									
	10	20	40	60	80	100	200	300	400	500
25	12.12	15.95	20.98	24.64	27.61	30.16	39.7	46.61	52.24	57.06
26	13.18	17.47	23.15	27.3	30.69	33.6	44.53	52.51	59.02	64.62
27	14.33	19.12	25.52	30.21	34.06	37.37	49.88	59.05	66.56	73.04
28	15.57	20.91	28.1	33.4	37.75	41.51	55.77	66.29	74.93	82.4
29	16.9	22.85	30.9	36.87	41.79	46.05	62.27	74.3	84.21	92.8
30	18.24	24.95	33.95	40.66	46.21	51.02	69.43	83.14	94.48	104.33
31	19.88	27.22	37.27	44.79	51.03	56.46	77.31	92.9	105.84	117.11
32	21.55	29.68	40.88	49.3	56.3	62.41	85.96	103.66	118.39	131.24
33	23.34	32.34	44.8	54.2	62.05	68.92	95.46	115.51	132.24	146.87
34	25.28	35.21	49.05	59.54	68.33	76.02	105.9	128.55	147.51	164.12
35	27.36	38.32	53.67	65.36	75.17	83.78	117.33	142.89	164.33	183.16
36	29.6	41.68	58.68	71.69	82.62	92.24	129.87	158.65	182.85	204.14
37	32.02	45.31	64.13	78.57	90.75	101.48	143.61	175.95	203.23	227.26
38	34.63	49.24	70.03	86.05	99.6	111.56	158.65	194.94	225.62	252.71
39	37.44	53.5	76.45	94.2	109.24	122.54	175.11	215.78	250.23	280.71
40	40.47	58.1	83.4	103.05	119.74	134.52	193.13	238.62	277.26	311.5
41	43.74	63.07	90.96	112.68	131.18	147.59	212.84	263.67	306.94	345.34
42	47.27	68.46	99.16	123.16	143.64	161.83	234.4	291.13	339.52	382.53
43	51.08	74.3	108.08	134.56	157.21	177.36	257.99	321.22	375.28	423.39
44	55.2	80.62	117.76	146.97	172	194.31	283.8	354.2	414.51	468.28
45	59.66	87.48	128.28	160.48	188.12	212.79	312.03	390.35	457.57	517.58

Fuente: (Braja M. Das, 2012).

3.1.2.2. Método de Vesic para Q_p en Arcilla ($\phi = 0$)

En arcilla saturada (condición con $\phi = 0$), la capacidad de carga de punta última de un pilote se puede aproximar con (Braja M. Das, 2012):

$$Q_p = A_p q_p = A_p c_u N_u^*$$

donde c_u = cohesión no drenada

De acuerdo con la teoría de expansión de cavidades de Vesic (1977),

$$N_c^* = \frac{4}{3} (\ln I_{rr} + 1) + \frac{\pi}{2} + 1$$

Las variaciones de N_c^* con I_{rr} para la condición con $\phi = 0$ se indican en la siguiente tabla.

Tabla 3

Variación de N_c^* con I_{rr} para la condición $\phi=0$

Irr	N*c
10	6.97
20	7.9
40	8.82
60	9.36
80	9.75
100	10.04
200	10.97
300	11.51
400	11.89
500	12.19

Fuente: (Braja M. Das, 2012).

Ahora,

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta}$$

para arcilla saturada sin cambio en volumen, $\Delta = 0$. De aquí,

$$I_{rr} = I_r$$

Para $\phi = 0$,

$$I_{rr} = \frac{E_s}{3c_u}$$

O'Neill y Reese (1999) sugirieron las relaciones aproximadas siguientes para I_r y la cohesión no drenada, c_u . (Braja M. Das, 2012)

Tabla 4**Relaciones aproximadas siguientes para I_r .**

Cu/Pa	Ir
0.24	50
0.48	150
≥ 0.96	250-300

Fuente: (Braja M. Das, 2012).

Los valores anteriores se pueden aproximar como

$$I_r = 347 \left(\frac{c_u}{P_a} \right) - 33 \leq 300$$

3.1.3. Método de Coyle y Castello para estimar Q_p en arena

Según (Braja M. Das, 2012), la capacidad de carga por punta por el método de Coyle y Castello de 1981, se calcula:

$$Q_p = q' N_q^* A_p$$

donde

q' = esfuerzo vertical efectivo en la punta del pilote

N_q^* = factor de capacidad de carga

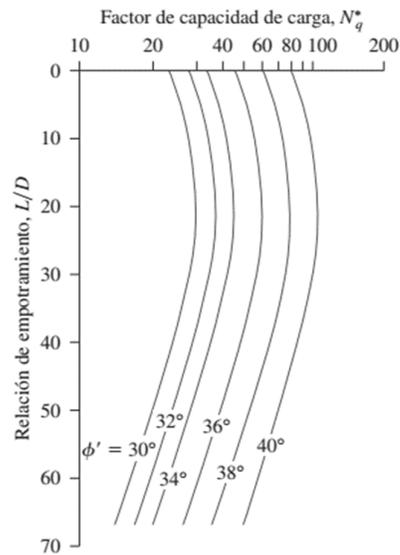


Figura 18 Valores de N_q^* con L/D y el ϕ .

Fuente: (Braja M. Das, 2012).

3.1.4. Método para calcular Q_p con resultados SPT

En (Bowles, 1977) se indica la fórmula para el cálculo de la capacidad de carga en punta de un pilote por medio del SPT, esta fórmula incorpora el $N_{cor} = N_{55}$, que es el número de penetración estándar corregido promedio en una zona de alrededor de 8D arriba a 3D bajo la punta del pilote.

$$Q_{pu} = A_p(40 * N_{cor}) * \frac{L_b}{D} \leq A_p(400 * N_{cor})$$

Dónde:

Q_{pu} = carga de punta última en kN

$N_{cor} = N_{55}$ = valor de N del SPT corregido promedio en un área de 8D arriba a 3D bajo la punta del pilote.

D = diámetro de la sección transversal del pilote

Lb/D = longitud del pilote en el estrato de apoyo

Para pilotes en arena, Briaud (1985), determina la resistencia de la punta con la siguiente expresión:

$$Q_{pu} = A_p(19.7 * P_a * N_{60}^{0.36})$$

Shioi y Fukui (1982) determinan lo siguiente para pilotes colados in situ y pilotes barrenados en arena gravosa, en ese orden.

$$Q_{pu} = A_p(3 * P_a)$$

$$Q_{pu} = A_p(0.1 * P_a * N_{60})$$

También se puede utilizar la ecuación siguiente para todo tipo de material del suelo.

$$Q_{pu} = A_p(0.3 * P_a * N_{60})$$

Dónde:

N_{60} = N del SPT, en un área de 8D arriba a 3D bajo la punta del pilote.

P_a = presión atmosférica = 100 kN/m².

También, (Braja M. Das, 2012), indica la siguiente correlación para el cálculo de la capacidad de carga en punta con valores N de SPT.

Meyerhof, sugirió que la última resistencia en la punta del pilote q_p , en un suelo granular, se puede calcular con los datos del SPT de campo, es decir no corregidos.

$$q_p = 0.4p_a N_{60} \frac{L}{D} \leq 4P_a N_{60}$$

Donde:

N_{60} = valores de N promediados a la profundidad de la punta del pilote, 10D arriba y 4D bajo el extremo inferior del pilote.

P_a = presión atmosférica = 100 kN/m².

3.1.5. Método para calcular Q_p con resultados CPT

Para estimar la capacidad de carga en la punta del pilote con datos del ensayo CPT, con la relación $L/D \geq 10$ se utiliza:

$$Q_{pu} = A_p q_c$$

Dónde:

Q_{pu} tiene las unidades de q_c

q_c = promedio de la resistencia de punta del cono en un área de 8D arriba a 3D bajo la punta del pilote.

(Braja M. Das, 2012), indica que Meyerhof sugirió la siguiente relación en suelo granular:

$$q_p = q_c$$

Donde:

q_c = es la resistencia de la penetración con cono.

3.1.6. Método API

3.1.6.1. Resistencia en punta en suelos cohesivos (método API)

(NEC, 2015), indica las recomendaciones de (API, 2000), las que indican que para pilotes que trabajan en arcilla, q [lb/ft²] = $9c$, además el

valor de c , se debe controlar cuando el estrado bajo la punta del pilote no sea homogéneo.

$$Q_t = qA_t$$

$$q = 9c$$

Donde:

Q_t = capacidad de la carga axial en la punta del pilote

q = resistencia unitaria en la punta del pilote

c = resistencia cortante no drenada ubicada en la punta, generalmente se ubica a 2D de la punta del pilote.

A_t = área de la punta del pilote.

3.1.6.2. Resistencia en punta en suelos no cohesivos (método API)

(NEC, 2015), indica seguir la recomendación de (API, 2000), para determinar la resistencia en la punta de pilotes en suelos no cohesivos con:

$$q = \bar{\sigma}_o * N_q$$

Dónde:

$\bar{\sigma}_o$ = presión efectiva en la punta del pilote.

N_q = factor de capacidad de carga

En la siguiente tabla se presentan valores del factor N_q , para diferentes tipos de suelos.

Tabla 5
Valores de N_q en el método API

Tipo de Suelo	δ , grados	Límite de f (kPa)
Arenas y limos muy sueltas a medianamente sueltas	15	47.8
Arenas y limos sueltas a densas	20	67
Arenas y arenas limosas medianamente sueltas a densas	25	83.1
Arenas y arenas limosas densas a muy densas	30	95.5
Gravas y arenas densas a muy densas	35	114.8

Fuente: (NEC, 2015)

3.1.7. Método USACE (Us Army Corps of Engineers)

3.1.7.1. Resistencia por punta en suelos cohesivos (Método USACE)

(NEC, 2015), indica que la resistencia en punta de pilotes que trabajan en arcilla se calcula con:

$$q = 9c$$

$$Q_t = Atq$$

Se debe considerar que para el desarrollo la resistencia en punta en arcilla, el movimiento puede ser mayor que la requerida en la resistencia por fricción del pilote.

Además, se puede ver la similitud del método en 3.1.6.1. Resistencia en punta en suelos cohesivos (método API)

3.1.7.2. Resistencia por punta en suelos no cohesivos (Método USACE)

(NEC, 2015), señala que la resistencia por punta de un pilote, se asume que se incrementa linealmente, a profundidad crítica D_c , y luego se

estabiliza constantemente. Además, la profundidad crítica esta entre 10D a 20D. entonces resistencia unitaria por punta, se calcula con:

$$q = \sigma'_v * N_q$$

Donde:

$$\sigma'_v = \gamma D$$

N_q = factor de capacidad de carga (Tabla 5)

3.1.8. Método FHWA (Federal Highway Works Administration of the United States)

3.1.8.1. Resistencia por punta (Método FHWA)

(NEC, 2015), muestra que la resistencia unitaria por punta, se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$q_t = cN_c + qN_q + \frac{\gamma B}{2} N_\gamma$$

Dónde:

N_c , N_q , N_γ = parámetros no dimensionales que dependen del ángulo de fricción del suelo.

c = cohesión del suelo

q = esfuerzo vertical en la punta del pilote

B = diámetro del pilote

γ = peso unitario del suelo

Para suelos cohesivos:

$$Q_t = A_t c N_c$$

N_c , de 7 a 16, es usual tomar el valor de 9.

Para suelos sin cohesión se determina mediante:

$$Q_t = A_t \bar{q} \alpha N_q$$

Dónde:

α = factor sin dimensión dependiente de la relación largo-ancho del pilote

N_q = factor de capacidad de carga

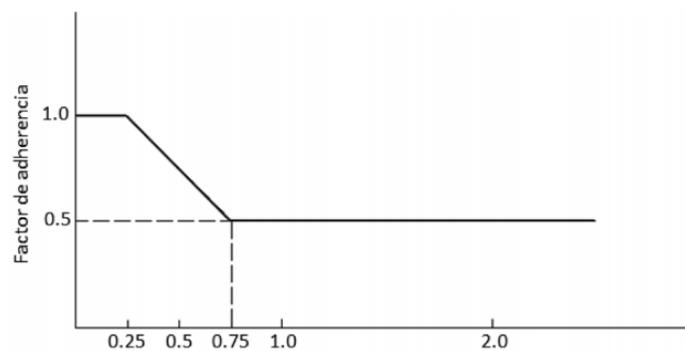


Figura 19 Valores de alfa recomendados

Fuente: (NEC, 2015)

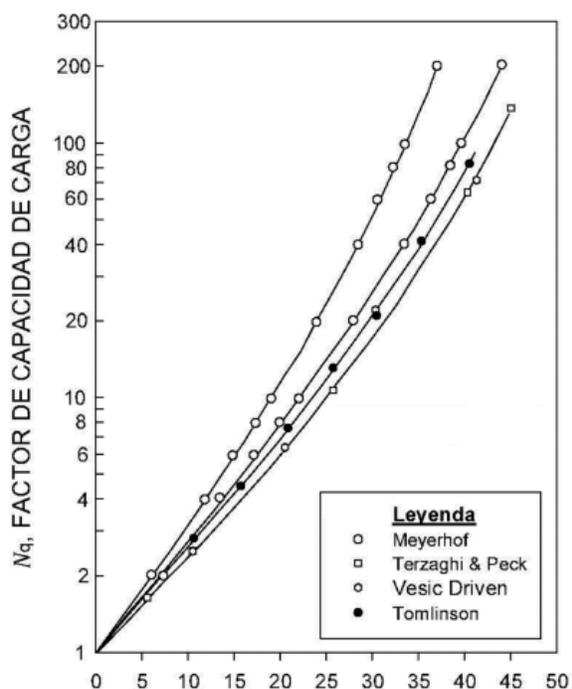


Figura 20: N_q de diferentes autores

Fuente: (NEC, 2015)

3.2. Capacidad de carga por resistencia superficial Q_s

Según (Bowles, 1977), hay tres métodos utilizados para determinar la capacidad de carga por resistencia superficial o fuste de pilotes en suelos cohesivos, conocidos como α , λ y β . El método β , también se utiliza para pilotes en suelos no cohesivos. En todos los casos mencionados, se utiliza la ecuación:

$$Q_s = \sum A_s f_s$$

Dónde:

Q_s = capacidad de carga por resistencia superficial o fuste, con unidades de f_s

A_s = área de superficie efectiva del pilote o también conocido como el área del fuste, en la que incide f_s , se calcula multiplicando el perímetro, p , por la longitud empotrada ΔL , en el estrato de apoyo.

ΔL = espesor del estrato de suelo o incremento en la longitud empotrada del pilote.

f_s = resistencia superficial por de área que actúa en ΔL , se calcula con los métodos descritos anteriormente.

Σ = sumatoria de las capacidades de carga de varios estratos o fragmentos del pilote.

3.2.1. Capacidad de carga por fricción (Q_s) en arena ($c=0$)

La resistencia por fricción, se describió en la sección 2.6, Ecuaciones para estimar la capacidad de un pilote, la misma es:

$$Q_s = \sum p \Delta L f$$

L' , es la longitud crítica, figura 21. Este valor esta entre 15D y 20D. Para estimar el valor de L' , se puede utilizar:

$$L' = 15D$$

Esta estimación es conservadora.

Para f_s , se puede utilizar la siguiente relación aproximada (figura 21):

De $z = 0$ hasta L'

$$f_s = K * \sigma'_v * \tan \delta$$

de $z = L'$ hasta L

$$f_s = f_{z=L'}$$

Donde

K = coeficiente efectivo que produce la presión del suelo

σ'_0 = esfuerzo vertical efectivo en la profundidad en consideración

δ = ángulo de fricción suelo-pilote, los valores se muestran en la tabla 7, de dependiendo del criterio, su valor oscila entre 0.5ϕ a 0.8ϕ . (Braja M. Das, 2012)

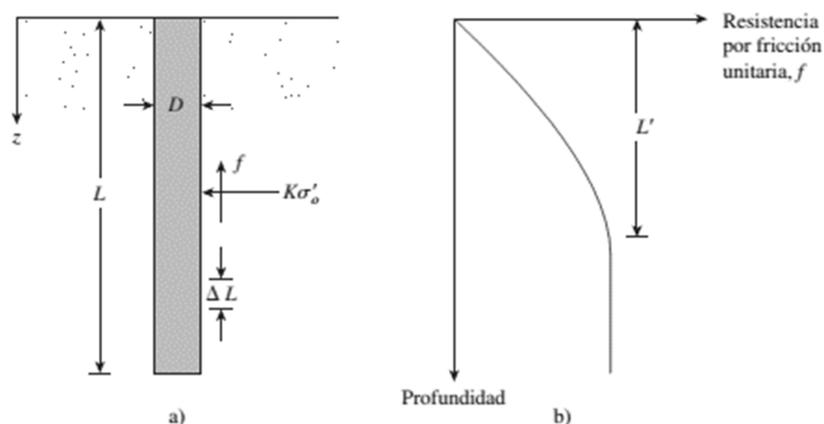


Figura 21 Resistencia por fricción unitaria

Fuente: BRAJA M. DAS, 2012.

Según (Braja M. Das, 2012), K , varía con la profundidad de empotramiento. En la parte superior del pilote, su valor es aproximadamente igual a K_p , coeficiente de presión pasiva del suelo y menor que K_0 , coeficiente de presión en reposo a mayor empotramiento.

Para la ecuación:

$$f_s = K * \sigma'_v * \tan \delta$$

Se recomienda utilizar los siguientes valores de K , de la tabla 6

Tabla 6
Valores promedio siguientes de K

Tipo de pilote	K
Perforado o hincado con ayuda de chorro de agua	$\approx K_o = 1 - \text{sen } \varphi'$
Hincado de bajo desplazamiento	$\approx K_o = 1 - \text{sen } \varphi'$ a ≈ 1.4 $K_o = 1.4 (1 - \text{sen } \varphi')$
Hincado de alto desplazamiento	$\approx K_o = 1 - \text{sen } \varphi'$ a ≈ 1.8 $K_o = 1.8 (1 - \text{sen } \varphi')$

Fuente: (Braja M. Das, 2012).

(Braja M. Das, 2012), indica que Mansur y Hunter, (1970), reportaron valor de K, basados en pruebas de campo:

K=1.65 para Pilotes H

K= 1.26, para pilotes con tubo de acero y

K= 1.5 para pilotes hormigonados in situ.

En pilotes hincados de desplazamientos considerables, K se calcula con:

$$K * \tan \delta = 0.18 + 0.0065 * Cr$$

Y

$$K = 0.5 + 0.008Cr$$

Dónde:

Cr = compacidad relativa o densidad relativa Dr (en porcentaje)

Coyle y Castello (1981), y con la teoría de la sección 3.1.3, propusieron que:

$$Q_s = f_{prom} pL = (K \bar{\sigma}'_o \tan \delta') pL$$

Donde:

$\bar{\sigma}'_o$ = promedio de la presión de sobrecarga efectiva

δ' = ángulo de fricción entre el suelo y el pilote que puede ser $0.8\phi'$

(Braja M. Das, 2012), indica que, mediante observaciones de campo, se determinó el valor de K en el gráfico 22.

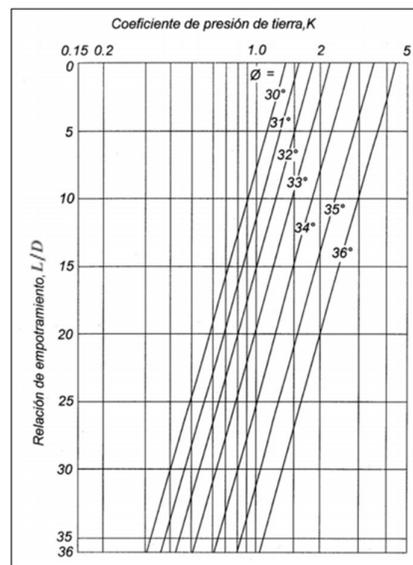


Figura 22 Variación de K con L/D

Fuente: (Braja M. Das, 2012)

Entonces:

$$Q_s = (K\bar{\sigma}'_o \tan 0.8\phi')pL$$

3.2.2. Método α

La fórmula general de este método es la siguiente: (Bowles, 1977)

$$f_s = \alpha * c + q' * K * \tan \delta$$

Dónde:

α = coeficiente de la tabla 8, figura 22 y figura 23 (L_b = profundidad de penetración en el estrato de cimentación).

c = promedio de cohesión del suelo; $\phi = 0^\circ$, para el estrato de suelo de cimentación.

q' = promedio del esfuerzo vertical efectivo en ΔL o al medio del mismo.

K = coeficiente de presión lateral de Rankine, va desde K_0 hasta 1.75 depende del volumen que se haya desplazamiento, la densidad inicial del suelo, etc. Se recomienda utilizar valores cercanos a K_0 , por efectos de fluencia del suelo en el tiempo.

δ = ángulo de fricción efectiva del sistema suelo - pilote (se puede utilizar el ángulo de fricción interna drenado, ϕ' , del suelo (valores de la tabla 8) utilizar $\delta = 0$ cuando $\phi = 0^\circ$)

K_0 , se puede calcular con:

$$K_0 = (1 - \sin \phi') \sqrt{OCR}$$

Tabla 7
Valores del coeficiente

Condiciones del suelo	Proporción de penetración (Lb/B)	Factor de adhesión (α)
Arenas o gravas arenosas rígidas superpuestas a suelos cohesivos muy rígidos	< 20 > 20	1.25
Arcillas suaves o limos rígidos superpuestos a suelos cohesivos muy rígidos	$8 < L_b/B \leq 20$ > 20	0.40
Suelos cohesivos rígidos a cohesivos muy rígidos sin estratos superpuestos	$8 < L_b/B \leq 20$ > 20	0.40

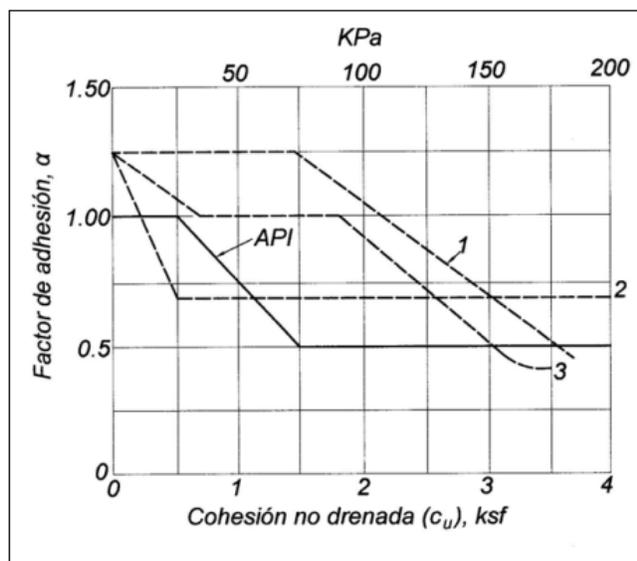
Fuente: (Bowles, 1977).

Tabla 8

Valore de δ , sistema suelo - pilote

Concreto masivo o mampostería en contacto con:	δ
Roca sana limpia	35°
Grava limpia, mezcla grava – arena, arena de grano grueso	29 – 31°
Arena limpia fina a media, arena limosa media a grano grueso, grava limosa o arcillosa	24 – 29°
Arena limpia fina, arena limosa o arcillosa fina a media	19 – 24°
Limo arenoso fino, limo no plástico	17 - 19°
Arcilla muy rígida y con residuos duros o preconsolidada	22 - 26°
Arcilla de rigidez media y rígida y arcillas arenosas	17 –19°

Fuente: (Bowles, 1977)

Figura 23 Valores del coeficiente α recomendado por la API.

Fuente: (Bowles, 1977).

De acuerdo con (Braja M. Das, 2012) el método α , la resistencia por fricción unitaria en suelos arcillosos ($\phi = 0$) se puede representar mediante la ecuación

$$f = \alpha c_u$$

Donde

α = factor empírico de adhesión (figura 23).

c_u = cohesión, resistencia al corte no drenado

Para arcillas normalmente consolidadas con un valor de $c_u \leq$ aprox. 1 klb/pie² (50 kN/m²), $\alpha = 1$, entonces:

$$Q_s = \sum f_s * p * \Delta L = \sum \alpha * c_u * p * \Delta L$$

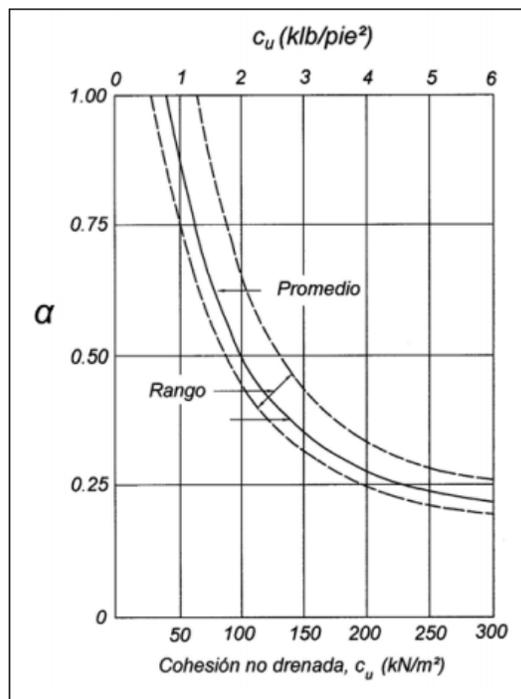


Figura 24 Coeficiente α para arcillas condición $\phi = 0$

Fuente: (Braja M. Das, 2012).

3.2.3. Método λ

En (Braja M. Das, 2012) cita que este método, inicialmente propuesto por Vijayvergiya y Focht (1972), se basa en la suposición que el desplazamiento del suelo ocasionado por el clavado del pilote da por resultado una influencia lateral pasiva a cualquier hondura, la resistencia por fricción se establece con:

$$f_s = \lambda * (q' + 2 * s_u)$$

Donde:

f_s está en las unidades de s_u .

s_u, q' = igual que el método α

λ = coeficiente obtenido de la figura 25.

q' se toma el valor de $\sigma_v' =$ es el esfuerzo efectivo ponderado en toda la longitud de hincado del pilote, de esta forma se obtiene f_{prom} .

En suelos que tienen en estratos se hace la media de los pesos específicos de suelo de las diferentes capas, para calcular el esfuerzo efectivo q' en la mitad del fuste del pilote.

También se presenta:

$$Q_s = p * L * f_{prom}$$

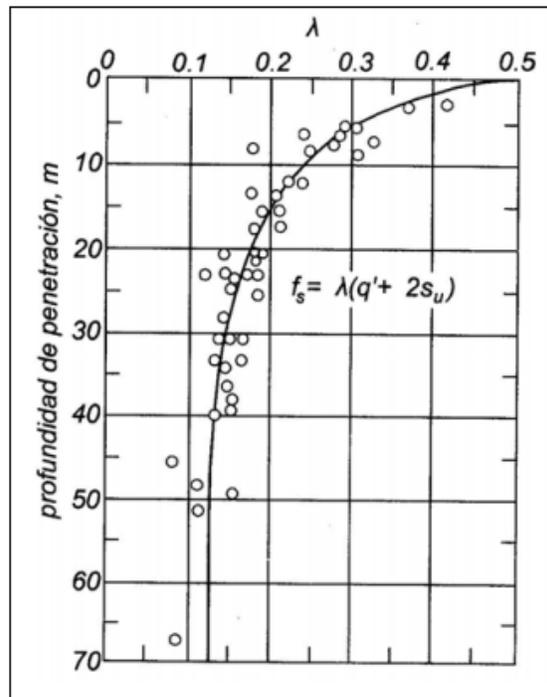


Figura 25 Valores de λ con respecto a la profundidad de empotramiento del pilote

Fuente: (Bowles, 1977).

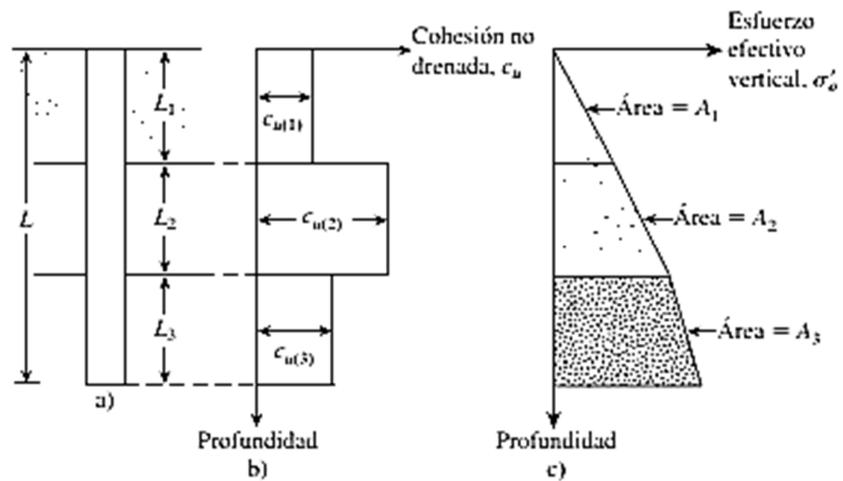


Figura 26 Aplicación del método λ en un suelo estratificado

Fuente: (Braja M. Das, 2012).

Según, (Braja M. Das, 2012), en la figura 26a se muestra un pilote que se hinca en tres capas de arcilla. En la figura 26b, el valor medio de c_u es $(c_{u(1)}L_1 + c_{u(2)}L_2 + \dots)/L$. igualmente, en la figura 26c se muestra la gráfica de la diferenciación del esfuerzo efectivo con la depresión. El esfuerzo efectivo medio es

$$\bar{\sigma}'_0 = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots}{L}$$

donde $A_1 + A_2 + A_3 + \dots =$ áreas de los diagramas del esfuerzo efectivo vertical.

3.2.4. Método β

Este método fue sugerido por Burland (1973), para determinar la resistencia por fricción se emplea la siguiente ecuación: (Braja M. Das, 2012).

$$f_s = \beta * q'$$

Donde:

$$\beta = K \cdot \tan\delta,$$

$\delta =$ ángulo de fricción en el pilote y suelo.

q' como las influencias de sobrecarga efectivas sobre z_i , se modifica por cargar extras q_s , entonces:

$$f_s = \beta \cdot (q' + q_s)$$

En los métodos anteriores, se utiliza q' como el esfuerzo vertical efectivo en la mitad del pilote, con una longitud ΔL , el coeficiente de fricción es $f = \tan\delta$, con estas deferencias, se debe realizar una apreciación para el ángulo

entre el suelo y el pilote. K puede ser = K_0 , donde se utiliza ϕ' = ángulo de fricción interna en esfuerzo efectivo comúnmente.

En pilotes con deslizamientos considerables, la apreciación de los valores de K y β es:

$$\beta = K * \tan \delta = 0.18 + 0.0065D_r$$

$$K = 0.50 + 0.008D_r$$

Tabla 9

Valores de K de empuje lateral, según Mansur y Hunter

Tipo de pilote	K
Pilotes H	1.4 – 1.9
Pilotes tubulares	1.2 – 1.3
Pilotes cuadrados de concreto prefabricados	1.45 – 1.6

Fuente: (Bowles, 1977).

La norma API, recomienda utilizar K con un valor de 0.8 en pilotes tubulares sin conexión ya sean estos a tensión o compresión; y K igual a 1 para pilotes de desplazamiento. (API, 2000)

Cuando los pilotes se hincan en arcillas saturadas, la presión de poro del agua en el suelo alrededor de los pilotes aumenta. El exceso de presión de poro del agua en arcillas normalmente consolidadas puede ser de cuatro a seis veces el valor de c_u . Sin embargo, más o menos al cabo de un mes, esta presión se disipa de manera gradual. De aquí, la resistencia por fricción unitaria para el pilote se puede determinar con base en los parámetros del esfuerzo efectivo de la arcilla en un estado remoldeado $c' = \beta \sigma'_0$. Así pues, a cualquier profundidad (BRAJA M. DAS, 2012.),

$$f = \beta \sigma'_0$$

donde

σ'_0 = esfuerzo vertical efectivo

$$\beta = K \tan \phi'_R$$

ϕ'_R = ángulo de fricción drenado de la arcilla remoldeada

K = coeficiente de presión de tierra

De manera conservadora, la magnitud de K es el coeficiente de presión de tierra en reposo, o

$$K = 1 - \sin \phi'_R \text{ (para arcillas normalmente consolidadas)}$$

y

$$K = (1 - \sin \phi'_R) \sqrt{OCR} \text{ (para arcillas sobreconsolidadas)}$$

donde OCR = relación de sobreconsolidación.

3.2.5. Resistencia por fricción por medio de resultados de SPT

Meyerhof (1976) indicó que la resistencia por fricción unitaria promedio, f_{prom} , para pilotes hincados de alto desplazamiento se podría obtener a partir de los valores promedio de la resistencia a la penetración estándar como

$$f_{prom} = 0.02 p_a (\bar{N}_{60})$$

donde

(\bar{N}_{60}) = valor promedio de la resistencia a la penetración estándar

p_a = presión atmosférica ($\approx 100 \text{ kN/m}^2$ o $2\,000 \text{ lb/pie}^2$)

Para pilotes hincados de bajo desplazamiento

$$f_{prom} = 0.001 p_a (\bar{N}_{60})$$

Briaud y colaboradores (1985) sugirieron que

$$f_{prom} \approx 0.224 p_a (\bar{N}_{60})^{0.29}$$

entonces,

$$Q_s = pL f_{prom}$$

Donde:

p = perímetro de la sección transversal del pilote

L = longitud total del pilote

Para determinar la resistencia por fricción con resultados de SPT se tiene:

$$f_s = \chi_m N_{cor}$$

Donde:

f_s seta en kPa

$\chi_m = 2.0$ para pilotes con gran volumen de desplazamiento
 $= 1.0$ para pilotes de volumen pequeño.

N_{cor} = promedio estadístico del número de golpes en el estrato (utilizar como N_{55})

3.2.6. Resistencia por fricción por medio de resultados de CPT

Meyerhof (1956), Thorburn y MacVicar (1971) para determinar la resistencia por fricción, sugirieron:

$$f_s = 0.005 \cdot q_c$$

Donde:

q_c = resistencia del cono de penetración en kPa

Para penetrómetros de cono la fricción lateral q_{cs} es:

$$f_s = q_{cs} \text{ (Pilotes de volumen de desplazamiento pequeño)}$$

$$f_s = 1.5 \text{ a } 2.0 \cdot q_{cs} \text{ (Pilotes de gran volumen)}$$

Donde:

f_s en mismas unidades que q_{cs} .

BRAJA M. DAS, 2012 anota que Nottingham y Schmertmann (1975) y Schmertmann (1978) proporcionaron correlaciones para estimar Q_s utilizando la resistencia por fricción (f_c) obtenida durante pruebas de penetración de cono. De acuerdo con este método

$$f = \alpha' f_c$$

Las variaciones de α' con z/D para penetrómetros de cono eléctrico y mecánico se muestran en las figuras 25 y 26,

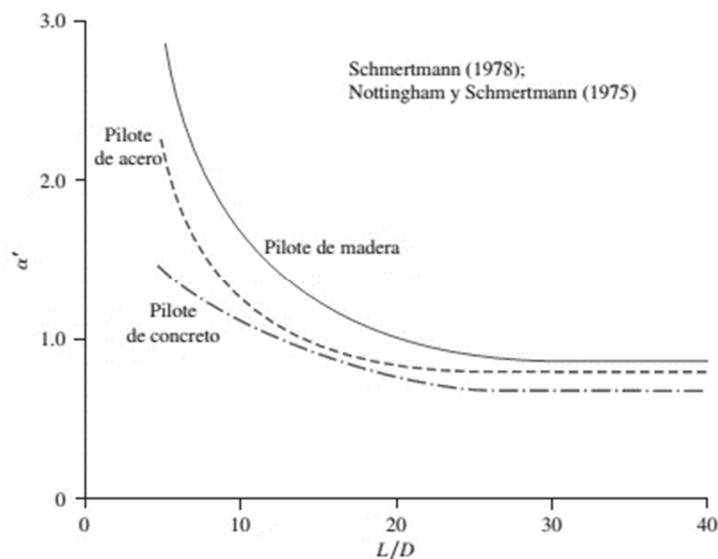


Figura 27 Variación de α' con la relación de empotramiento para pilotes en arena: penetrómetro de cono eléctrico

Fuente: (Braja M. Das, 2012).

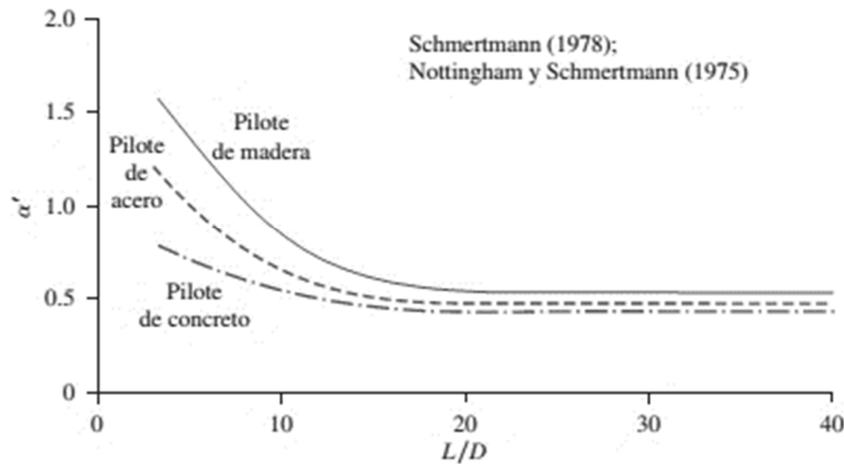


Figura 28 Variación de α' con la relación de empotramiento para pilotes en arena: penetrómetro de cono mecánico.

Fuente: (Braja M. Das, 2012).

respectivamente. Se tiene

$$Q_s = \sum p(\Delta L) f = \sum p(\Delta L) \alpha' f_c$$

3.2.7. Método API

3.2.7.1. Resistencia por fricción en suelos cohesivos (método API)

La API (American Petroleum Institute), recomienda el método detallado a continuación.

Primero se debe determinar el valor de c (resistencia al esfuerzo cortante no drenado).

Con el valor de c , se calcula el valor α , tomando en cuenta que $\alpha \leq 1.0$, mediante:

$$\alpha = 0.5\psi^{-0.50} \text{ si } \psi \leq 1.0$$

$$\alpha = 0.5\psi^{-0.25} \text{ si } \psi > 1.0$$

Donde:

$\psi = c/\bar{p}$ para la profundidad de interés

\bar{p} = presión efectiva

c = resistencia cortante no drenada del suelo

Ahora la resistencia unitaria por fricción f_x se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$f_x = \alpha_x c_x$$

Donde:

α_x = coeficiente obtenido anteriormente

c_x = resistencia cortante no drenada en la profundidad x

3.2.7.2. Resistencia por fricción en suelos no cohesivos (método API)

API RECOMMENDED PRACTICE 2A-WSD (RP 2A-WSD), 2007, recomienda:

$$f = K\bar{\sigma}_0 \tan \delta$$

Dónde:

K = coeficiente de presión lateral del suelo (relación entre el esfuerzo efectivo normal horizontal al vertical)

$\bar{\sigma}_0$ = presión o esfuerzo efectivo en el punto en cuestión

δ = ángulo de fricción entre el suelo y el pilote

Se utiliza un valor de $K = 0.8$ para pilotes con punta abierta y un valor de $K = 1.0$ para pilotes de desplazamiento completo.

La siguiente tabla muestra valores de δ y f recomendados por este método.

Tabla 10**Valores para determinar la fricción lateral en suelos no cohesivos.**

Tipo de Suelo	δ , grados	Límite de f (kPa)
Arenas y limos muy sueltas a medianamente sueltas	15	47.8
Arenas y limos sueltas a densas	20	67
Arenas y arenas limosas medianamente sueltas a densas	25	83.1
Arenas y arenas limosas densas a muy densas	30	95.5
Gravas y arenas densas a muy densas	35	114.8

Fuente: (API, 2000)**3.2.8. Método USACE (Us Army Corps of Engineers)****3.2.8.1. Resistencia por fricción en suelos cohesivos (Método USACE)**

La resistencia se da por la adhesión de arcilla en la superficie del pilote, también conocida como la cohesión del material en el que se empotra el pilote.

$$f_s = c_a = \alpha c$$

$$Q_s = f_s A_s$$

Dónde:

c_a = adhesión entre la arcilla y el pilote

α = factor de adhesión obtenido en función de la resistencia al esfuerzo cortante no drenado

c = resistencia al esfuerzo cortante no drenado

3.2.8.2. Resistencia por fricción en suelos no cohesivos (Método USACE)

Para propósitos de diseño, la resistencia por fricción de pilotes en arena, incrementa linealmente a una profundidad crítica asumida (D_c) y luego permanece constante debajo de esa profundidad. La profundidad

crítica varía entre 10 a 20 veces el diámetro del pilote, dependiendo de la densidad relativa de la arena. La profundidad crítica es asumida como:

$D_c = 10B$ para arenas sueltas

$D_c = 15B$ para arenas medianamente densas

$D_c = 20B$ para arenas densas

La resistencia por fricción unitaria que actúa en el pilote, se determina mediante las siguientes ecuaciones:

$$f_s = K \sigma'_v \tan \delta$$

$$\sigma'_v = \gamma' D \quad (\text{para } D < D_c)$$

$$\sigma'_v = \gamma' D_c \quad (\text{para } D \geq D_c)$$

$$Q_s = A f_s$$

Dónde:

K = coeficiente de presión lateral del suelo

σ'_v = esfuerzo efectivo vertical

δ = ángulo de fricción entre el suelo y el pilote

γ' = peso unitario efectivo del suelo

D = profundidad a lo largo del pilote en la cual la presión efectiva es calculada

3.2.9. Método FHWA (Federal Highway Works Administration of the United States)

3.2.9.1. Resistencia por fricción (Método FHWA)

El método propone el cálculo de la resistencia última por fricción, mediante la fórmula:

$$f_s = c_a + \sigma_h \tan \delta$$

Dónde:

c_a = adhesión pilote suelo

σ_h = componente normal del esfuerzo a la interface suelo pilote

δ = ángulo de fricción pilote suelo

El esfuerzo normal σ_h está relacionado con el esfuerzo vertical σ_v mediante $\sigma_h = K\sigma_v$, donde K es un coeficiente de presión lateral.

Para suelos cohesivos el segundo término de la ecuación es igual a cero y c_a se lo relaciona con la resistencia cortante no drenada mediante la siguiente ecuación:

$$c_a = \alpha S_u$$

Dónde:

α = coeficiente empírico de adhesión que depende principalmente de los siguientes factores: naturaleza y resistencia del suelo, tipo de pilote, método de instalación, y efectos del tiempo.

3.3. Capacidad de carga para grupos de pilotes

Las presiones por punta y fricción en pilotes se muestran idealizadas en la figura 27.

Para que el suelo no falle por corte ni se presenten asentamientos excesivos, el espaciamiento entre pilotes debe ser el adecuado. En las zonas de esfuerzo, la intensidad de esfuerzo superpuesta decrece con el incremento del espacio entre pilotes del grupo (s = espacio entre pilotes del grupo medidos de eje a eje).

En un grupo de pilotes, un pilote individual reparte la carga sobre los pilotes adyacentes o en todo en grupo, por esta razón los espaciamientos grandes no son prácticos en este tipo de configuración. Los valores de espaciamiento se muestran en la tabla 10.

Tabla 11

Espaciamientos mínimos en grupo de pilotes

Tipo de pilote	BOCA, 1984 (sec. 1013.8)	NBC, 1976 (sec. 912.1L)	Chicago, 1987 (sec. 70.4)
Pilotes por fricción	$2D$ o $1.75H \geq 30"$	$2D$ o $1.75H \geq 30"$	D o $1.75H \geq 30"$
Pilotes de carga en punta	$2D$ o $1.75H \geq 24"$	$2D$ o $1.75H \geq 24"$	

Fuente: (Bowles, 1977).

Donde:

D = diámetro o base del pilote

H = diagonal de la sección de un pilote rectangular o H .

El espaciamiento óptimo está en el rango de 2.5 a 3.5D o dos a 3H para cargas verticales en el grupo de pilotes.

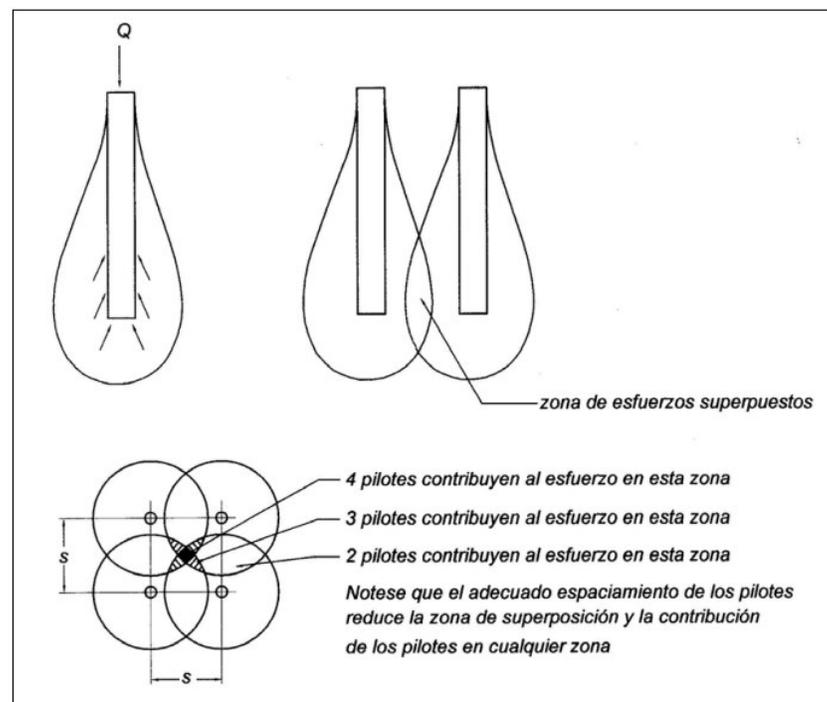


Figura 29 Zona de esfuerzos para grupo de pilotes.

Fuente: (Bowles, 1977).

Según registros (Bowles, Joseph E.; Foundation analysis and design.), se han determinado espaciamientos máximos de 8 o 10D. estos valores los reportan los códigos de construcción.

En la siguiente figura se muestran configuraciones comunes de grupos de pilotes:

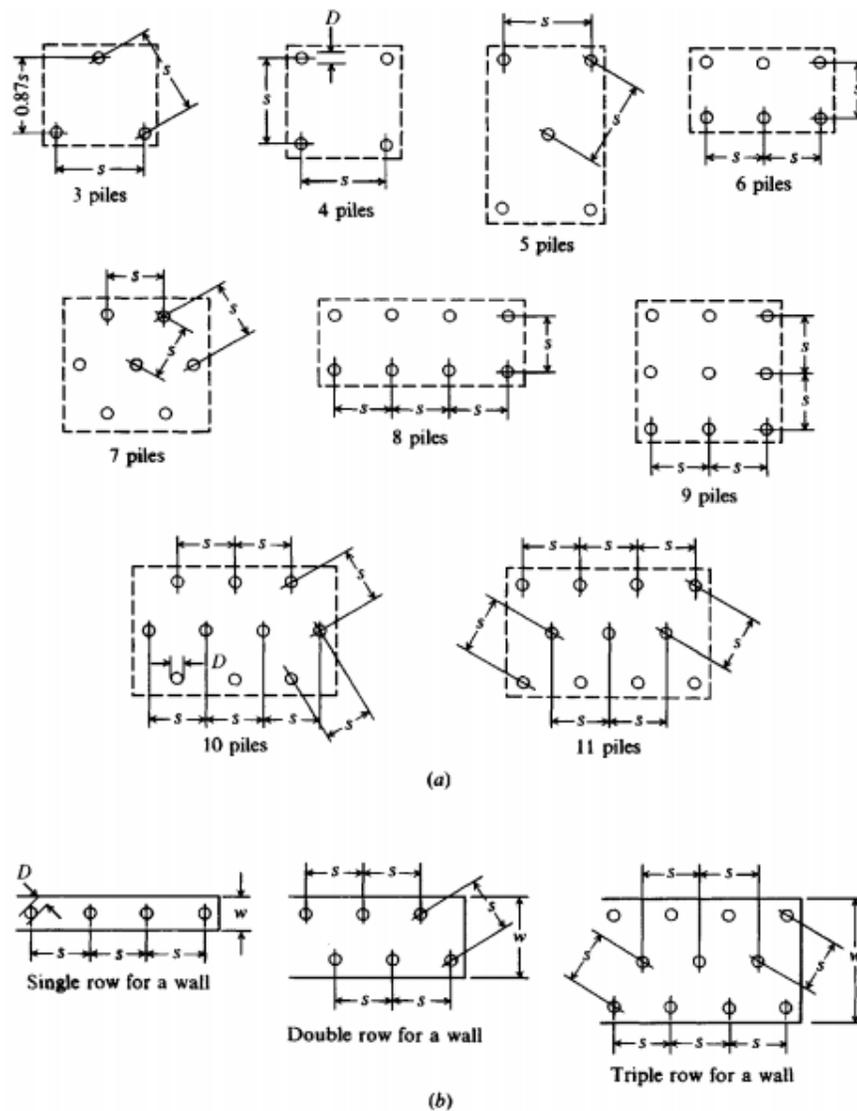


Figura 30 Configuración típica de grupo de pilotes, a) para pilas aisladas, b) para muros de cimentación

Fuente: (Bowles, 1977).

3.3.1. Eficiencia de grupo de pilotes

La eficiencia del grupo de pilotes η , se define como:

$$\eta = \frac{Q_{g(u)}}{\sum Q_u}$$

Donde:

$Q_{g(u)}$ = capacidad de soporte de carga última del grupo de pilotes

Q_u = capacidad de soporte de carga última de cada pilote sin el efecto de grupo = número de pilotes multiplicado por la capacidad individual del pilote.

La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) no recomienda utilizar la eficiencia de grupo como comportamiento en grupo. Sugiere que para pilotes por fricción en suelos granulares con el espaciamiento usual de $s = 2$ a $3D$ tendrá una eficiencia $\eta \geq 1$ (esto porque el suelo granular se densifica en las cercanías del pilote modificando los parámetros iniciales usados para el cálculo, con efectos acumulados de más de un pilote).

Para pilotes por fricción en suelos cohesivos la resistencia de corte del bloque más la carga de punta del grupo se usa como la capacidad del grupo, pero en ningún caso la capacidad de grupo es considerada más grande que la capacidad individual de un pilote por el número de pilotes del grupo.

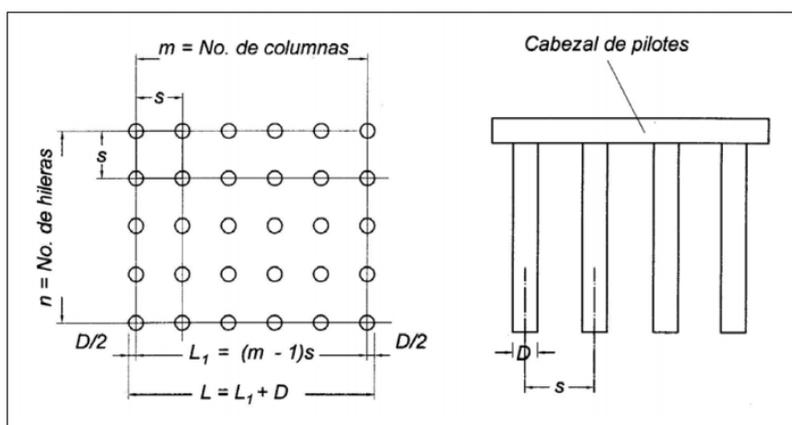


Figura 31 Configuración de grupo de pilotes.

Fuente: (Bowles, 1977).

Según la norma AASHTO, se sugiere una modificación de la ecuación Converse – Labarre:

$$E_g = 1 - \theta * \frac{(n - 1) * m + (m - 1) * n}{90 * m * n}$$

Donde:

$E_g = \eta$ = eficiencia del grupo de pilotes

m , n y D se muestran en la figura 31.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{D}{S} \right)$$

θ en grados

esta ecuación se la emplea solo en grupo rectangulares de pilotes, donde los valores de m y n son fácilmente determinables.

Otra formulación para grupo de pilotes es la propuesta por Los Ángeles Group Action:

$$E_g = 1 - \frac{D}{\pi * s * n * m} \{ n * (m - 1) + m(n - 1) + \sqrt{2} * (n - 1)(m - 1) \}$$

Para el mismo caso, Seiler y Keeney (1944), propone:

$$E_g = \left\{ 1 - \left(\frac{11 * s}{7 * (s^2 - 1)} \right) \left(\frac{n + m - 2}{n + m - 1} \right) \right\} + \frac{0.3}{n + m}$$

El caso más común en grupo de pilotes es cuando el cabezal que une a los pilotes, se funde directamente sobre el terreno, y la capacidad del grupo es mínimo la capacidad de bloque basada en el corte alrededor del perímetro del grupo definido por las dimensiones en planta más la capacidad del bloque en la punta de los pilotes.

Para casos en que el cabezal del grupo de pilotes está por encima del suelo, la capacidad del grupo será menor que la capacidad del bloque

basada en la capacidad de carga óptima en la punta de los pilotes y La suma de la capacidad individual de los pilotes.

La capacidad de carga de un grupo de pilotes puede determinarse en función del espaciamiento s entre pilotes del grupo, una forma es tomar el grupo de pilotes como un bloque de dimensiones $p_g = L_g \times B_g \times L$, la otra es tomar la capacidad como la suma de capacidades individuales.

La capacidad por fricción del bloque entonces es:

$$Q_{g(u)} \cong f_{prom} * p_g * L$$

Y la eficiencia del grupo es:

$$E_g = \frac{Q_{g(u)}}{\sum Q_u} = \frac{f_{prom} * \{2 * (n + m - 2) * s + 4D\} * L}{n * m * p * L * f_{prom}}$$

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

Si el espaciamiento, s , es lo suficientemente grande $E_g > 1$, por lo que el comportamiento del grupo es la suma de las capacidades individuales, entonces la capacidad del grupo se determina mediante:

$$Q_{g(u)} = \left\{ \frac{2 * (n + m - 2) * s + 4D}{p * n * m} \right\} * \sum Q_u$$

Si $E_g < 1$ la capacidad última del grupo es:

$$Q_{g(u)} = E_g * \sum Q_u$$

Si $E_g \geq 1$:

$$Q_{g(u)} = \sum Q_u$$

El método sugerido por Feld (1943), básicamente reduce la capacidad de carga última en 1/16 de cada pilote, en función de la diagonal adyacente.

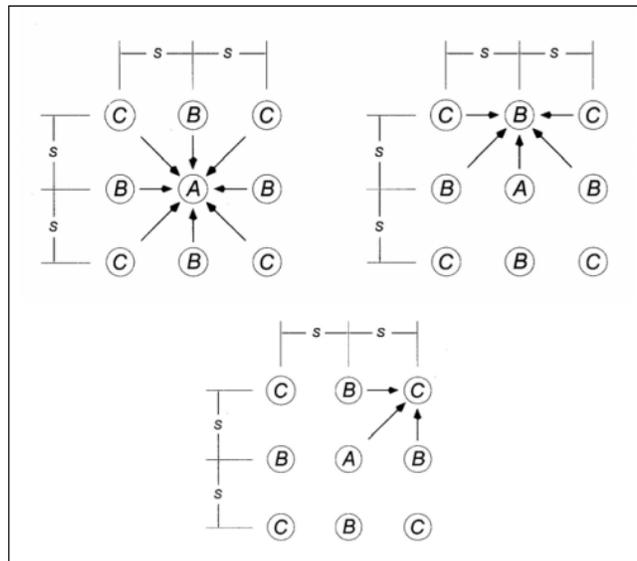


Figura 32 Eficiencia de grupo de pilotes, método Feld.

Fuente: (Braja M. Das, 2012).

$$F_r = 1 - \frac{\text{No. pilotes adyacentes}}{16}$$

Capacidad última = No. de pilotes, según posición \times $F_r \times Q_u$

Q_u = capacidad individual del pilote

Tabla 12

Método Feld para grupo de pilotes

Pilote	No. de pilotes	Pilotes adyacentes	Factor de reducción	Capacidad última
A	1	8	$1 - 8/16 = 0.5$	$1 \times 0.5 = 0.5 \cdot Q_u$
B	4	5	$1 - 5/16 = 0.6875$	$4 \times 0.6875 = 2.75 \cdot Q_u$
C	4	3	$1 - 3/16 = 0.8125$	$4 \times 0.8125 = 3.25 \cdot Q_u$
			$\Sigma Q_u = Q_{g(u)} =$	$6.5 \cdot Q_u$

Fuente: (Braja M. Das, 2012).

Entonces la eficiencia del grupo es:

$$E_g = \frac{Q_{g(u)}}{\sum Q_u} = \frac{6.5 * Q_u}{9 * Q_u} = 72\%$$

La suma de capacidades individuales (para arcillas y arenas), se define como:

$$Q_{g(u)} = n * m * (Q_p + Q_s)$$

Donde:

$Q_p = A_p * (cN'_c + \eta qN'_q)$ = capacidad de carga de punta individual

$Q_s = \sum A_s * f_s$ = capacidad de carga por fricción individual

Y la capacidad de carga para el grupo de pilotes es:

$$Q_{p(g)} * (cN'_c + \eta qN'_q)$$

Donde:

$\eta=1$ (Método Meyerhof)

$A_{p(g)}$ = área de punta del grupo = $L_g * B_g$

La capacidad por fricción del grupo es:

$$Q_{s(g)} = \sum A_{s(g)} * f_s$$

Donde:

$A_{s(g)}$ = área del fuste del grupo = perímetro del grupo * longitud de pilotes

$A_{s(g)} = 2 * (L_g + B_g) * L$

f_s = fricción superficial determinada por cualquier método

3.3.2. Capacidad de carga en grupo de pilotes en arena (c=0)

Para grupo de pilotes en arena, se tienen las siguientes consideraciones:

Si el espaciamiento, $s \geq 3D$, $Q_g(u)$ puede tomarse como la suma de capacidades individuales de cada pilote, esto incluye la capacidad por fricción superficial y por punta de cada uno.

Para pilotes perforados en arena con espaciamiento convencional ($s \approx 3D$), $Q_g(u)$ puede tomarse de $2/3$ a $4/3$ de la suma de capacidades individuales, también incluye la capacidad por fricción y de punta de cada pilote.

3.3.3. Capacidad de carga en grupo de pilotes en arcilla ($\phi = 0$)

El grupo de pilotes se encuentra en arcilla saturada, por esta condición se omite el valor de $\eta q N'c$ y el término $N'c$ se toma igual a 9, por lo tanto, se determina la capacidad de carga con:

$$\sum Q_u = n * m \left(9 * A_p * c_{u(p)} + \sum \alpha * p * c_u * \Delta L \right)$$

Donde:

A_p = área de punta

A_s = área del fuste = $p \cdot \Delta L$

$c_{u(p)}$ = cohesión no drenada (s_u) en la punta del pilote

p = perímetro del área transversal del pilote

c_u = cohesión no drenada en el fuste

ΔL = elemento diferencial del fuste

α = factor de adhesión

Luego se determina la capacidad de carga del bloque $L_g \times B_g \times L$, mediante:

$$\sum Q_u = L_g * B_g * c_{u(p)} * N'_c + \sum 2 * (L_g + B_g) * c_u * \Delta L$$

Donde:

$L_g \cdot B_g$ = "área de punta" del bloque (figura 33)

N'_c = factor de capacidad de carga (ver figura 34 o puede tomarse igual a 9 en arcillas condición $\phi = 0$ si no se dispone de tablas o más datos, en caso de valores de L/B g mayores a 5 puede extrapolarse)

Se puede determinar la capacidad del grupo con el factor α , mediante:

$$\sum Q_u = L_g * B_g * c_{u(p)} * N'_c + \sum 2 * \alpha * (L_g + B_g) c_u * \Delta L$$

Finalmente se elige el menor de los resultados obtenidos anteriormente.

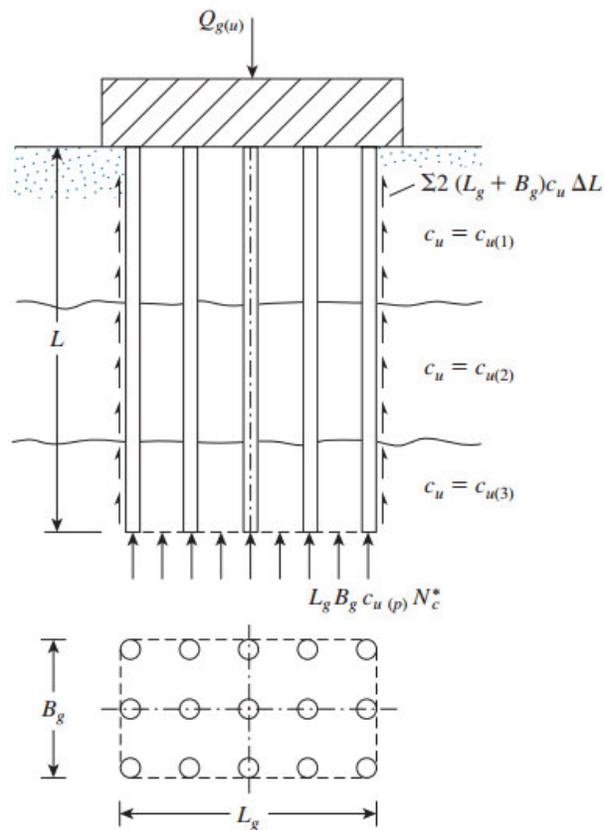


Figura 33 Grupo de pilotes en arcilla

Fuente: (Braja M. Das, 2012).

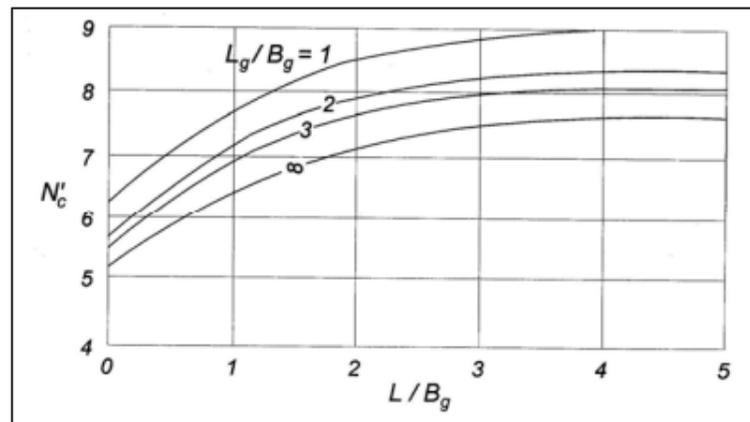


Figura 34 N'_c para grupos de pilotes en arcilla

Fuente: (Braja M. Das, 2012).

3.4. Asentamientos en pilotes

3.4.1. Asentamiento elástico en pilotes

En, (Braja M. Das, 2012), indica que el asentamiento total en pilotes que trabajan solos a una carga vertical Q_w , se da por la siguiente expresión:

$$S_e = S_{e(1)} + S_{e(2)} + S_{e(3)}$$

Donde:

$S_{e(1)}$ = asentamiento elástico del pilote

$S_{e(2)}$ = asentamiento del pilote por la carga en punta

$S_{e(3)}$ = asentamiento del pilote por la carga en el fuste

La deformación del fuste, se evaluará según la mecánica de materiales, tomando en cuenta que el material con el que está construido el pilote es elástico, con la siguiente expresión:

$$S_{e(1)} = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws})L}{A_p * E_p}$$

Donde:

Q_{wp} = carga soportada en la punta del pilote con carga de trabajo

Q_{ws} = carga soportada por la resistencia por fricción con carga de trabajo

A_p = área de la sección transversal del pilote

L = longitud del pilote

E = Modulo de elasticidad del material del pilote

ξ , está en el rango de 0.5 a 0.67, y está ligada a la naturaleza de la repartición de la resistencia que se da por fricción f , en el fuste del pilote.

La siguiente expresión, indica la deformación del pilote por la carga que actúa en la punta del mismo:

$$S_{e(2)} = \frac{q_{wp}D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{wp}$$

Donde:

D = diámetro del pilote

Q_{wp} = carga puntual por área unitaria en la punta del pilote = Q_{wp}/A_p

E_s = módulo de elasticidad del suelo en el estrato de cimentación

μ_s = relación de Poisson del suelo

I_{wp} = factor de influencia = 0.85

(Braja M. Das, 2012), indica que, en 1977, Vesic, hizo la propuesta de un modelo semi-empirico, para determinar el asentamiento $s_{e(2)}$, mediante:

$$S_{e(2)} = \frac{Q_{wp}c_p}{Dq_p}$$

Ahora el asentamiento provocado por cargas de trabajo en el fuste, se obtienen con:

$$s_{e(3)} = \left(\frac{Q_{ws}}{pL} \right) \frac{D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

Donde:

p = perímetro del pilote

L = longitud empotrada del pilote

I_{ws} = factor de influencia

Q_{ws}/pL , de la ecuación anterior es el promedio de f , en toda la longitud del pilote, además:

$$I_{ws} = 2 + 0.35 \sqrt{\frac{L}{D}}$$

Para $s_{e(3)}$, Vesic (1977), propuso:

$$s_{e(3)} = \frac{Q_{ws} c_s}{L q_p}$$

CAPÍTULO IV EJEMPLOS DE CÁLCULO

4.1. Detalle de ejemplos prácticos.

4.1.1. Descripción de datos recolectados

4.1.1.1. Ejemplo práctico 1

Los datos del primer ejemplo son extraídos de una exploración de suelo en la provincia de Esmeraldas, en el sector “Las Palmas”, a continuación, se muestran los datos de ensayo dinámico en 2 puntos de sondeo:

Tabla 13
Detalle de sondeo

Descripción tipo de suelo	No.	Profundidad (m)	N (SPT)
Arena Fina de mar color Grisácea	1	1	7
	2	2	3
	3	3	7
Arena fina de mar color gris oscuro	4	4	15
	5	5	8
	6	6	19

4.1.1.2. Ejemplo práctico 2

Los datos de este ejemplo son tomados de los sondeos realizados en el cauce del río Esmeraldas en la provincia del mismo nombre, se decidió realizar este ejemplo para evaluar los métodos para la estimación de la capacidad de carga por fuste en pilotes circulares, hincados. El sondeo tiene una lámina de agua de 6 metros y arena arcillosa color café (20m), ángulo de fricción interna $\phi=28^\circ$ y cohesión, $c_u=5 \text{ T/m}^2$

Para la estimación de la capacidad de carga se presentan los siguientes datos:

Peso específico saturado= $\gamma_{sat}=1.5 \text{ T/m}^3$

Pilote circular

Dimetro:0.50 m.

Longitud: 26 m.

4.1.1.3. Ejemplo práctico 3

Para el desarrollo del ejemplo de cálculo 3, se realizará la comprobación del cálculo de la capacidad de carga en una cimentación piloteada para el estribo de un puente, en este contexto, se seleccionó un perfil estratigráfico variable (Anexo 1,) es decir que contenga estratos con diferentes materiales para utilizar diferentes métodos de cálculo.

Como se indicó en el párrafo anterior, la estratigrafía es variada y tomando en cuenta las cargas transmitidas a la cimentación, riesgo de socavación y carga por sismo (Cargas cíclicas), se ha recomendado el uso de pilotes barrenados o pre excavados in-situ, debido a su construcción simple y muy común en el medio.

Con la información de la estratigrafía y análisis de laboratorio, se realiza el cálculo de pilotes que trabajan a fricción en los estratos que tiene suelo cohesivo, friccionante o ambos y pilotes que trabajan con punta para estratos que contengan arena o arcilla.

El estrado de apoyo o de cimentación se ubica a 19.50 metro de profundidad, en el estrato que contiene arena limosa y grava de canto rodado, color gris verdoso, poca presencia de finos no plásticos, y compacidad relativa muy densa. El ensayo SPT, muestra N en el campo de 50 golpes con avance máximo de 3", las condiciones anteriores indican que el estrato de apoyo tiene una excelente capacidad portante con gran aporte en la punta y hasta la profundidad de 18 metros el aporte es por fricción.

4.1.2. Aplicación de métodos de calculo

4.1.2.1. Ejemplo práctico 1

Para los ejemplos prácticos se utilizarán pilotes circulares hincados de diámetro 0.5 metros, y longitud 5 metros.

Para los datos del punto 1

El valor promedio de N del primer estrato es:

$$\bar{N} = \frac{7 + 3}{2} = 5$$

Entonces según la tabla 14

Tabla 14

Valores de Dr, ángulo de fricción y peso específico

Suelo	Dr	SPT N'70			φ°			γ (natural o húmedo)	
		fino	medi o	grues o	fino	medio	grues o	lb/pie ³	kN/m ³
Muy suelto	0								
	0.1	1, 2	2, 3	3, 6	26, 28	27, 28	28, 30	70, 100	11, 16
Suelto	0.3	3, 6	4, 7	5, 9	28, 30	30, 32	30, 34	90, 115	14, 18
Medio	0.6	7, 15	8, 20	10, 25	30, 34	32, 36	33, 40	110, 130	17, 20
Denso	0.8	16, 30	21, 40	26, 45	33, 38	36, 42	40, 50	110, 140	17, 22
Muy denso	5	¿?	> 40	> 45	< 50	130, 150	20, 23		

Fuente: (Bowles, 1977)

$$\gamma_1 = 14 \text{ kN/m}^3 = 1.4 \text{ T/m}^3$$

El valor promedio de N del segundo estrato es:

$$\bar{N} = \frac{7 + 15 + 8 + 19}{4} = 12$$

$$\gamma_2 = 17 \text{ kN/m}^3 = 1.7 \text{ T/m}^3$$

Ahora calculamos el valor de N corregido.

para el estrato superior tenemos:

$$\sigma'_{v(3)} = \gamma_1 \cdot h_1 = 1.40 \cdot 2 = 2.80 \text{ T/m}^2$$

Los esfuerzos efectivos para el estrato inferior se calculan de la siguiente manera:

$$\sigma'_{v(3)} = 2.80 + (1.70) \cdot (1) = 4.50 \frac{\text{T}}{\text{m}^2} = 0.41 \frac{\text{T}}{\text{pie}^2}$$

$$\sigma'_{v(4)} = 4.50 + (1.70) \cdot (1) = 6.20 \frac{\text{T}}{\text{m}^2} = 0.57 \frac{\text{T}}{\text{pie}^2}$$

$$\sigma'_{v(5)} = 6.20 + (1.70) \cdot (1) = 7.90 \frac{\text{T}}{\text{m}^2} = 0.73 \frac{\text{T}}{\text{pie}^2}$$

$$\sigma'_{v(6)} = 7.90 + (1.70) \cdot (1) = 9.60 \frac{\text{T}}{\text{m}^2} = 0.89 \frac{\text{T}}{\text{pie}^2}$$

Una vez determinados los esfuerzos en cada nivel, se calcula el factor de corrección con la fórmula de Liao y Whitman:

$$F_c = \sqrt{\frac{1}{\sigma'_v}}$$

$$F_{c(3)} = \sqrt{\frac{1}{0.41}} = 1.56$$

$$F_{c(4)} = \sqrt{\frac{1}{0.57}} = 1.32$$

$$F_{c(5)} = \sqrt{\frac{1}{0.73}} = 1.17$$

$$F_{c(6)} = \sqrt{\frac{1}{0.89}} = 1.05$$

Entonces los valores corregidos son:

$$N_{corr} = F_{c(6)} * N$$

$$N_{corr(3)} = 1.56 * 7 = 11$$

$$N_{corr(4)} = 1.32 * 15 = 20$$

$$N_{corr(5)} = 1.17 * 8 = 9$$

$$N_{corr(6)} = 1.05 * 19 = 20$$

Siguiendo la correlación de Liao y Whitman, se realiza la corrección para los valores mayores a 15:

$$N_{corr} = 15 + 0.5 * (N - 15)$$

$$N_{corr(4)} = 15 + 0.5 * (15 - 15) = 15$$

$$N_{corr(6)} = 15 + 0.5 * (19 - 15) = 17$$

Con los valores de N corregidos, se calcula el promedio en el estrato inferior:

$$\overline{N}_{corr} = \frac{11 + 15 + 9 + 17}{4} = 13$$

Capacidad de carga en punta por SPT

Se debe calcular el valor de N50 corregido a partir de Ncorr:

$$N'_{55} = 13 * \frac{70}{55} = 17$$

Entonces:

$$Q_{pu} = A_p * 40 * N_{corr} * \frac{L}{B}$$

$$A_p = \pi * \frac{\text{diametro}^2}{4} = \pi * \frac{0.5^2}{4} = 0.19\text{m}^2$$

Finalmente:

$$Q_{punta} = 0.19 * 40 * 17 * \frac{3}{0.5} = 775 \text{ kN} = 79.03 \text{ T/m}^2$$

Y la carga limite en la punta del pilote es:

$$Q_{p(lim)} = A_p * 400 * N_{corr} = 0.19 * 400 * 17 = 1292 \text{ kN} = 131.75 \text{ T/m}^2$$

Método de Meyerhof

Para el cálculo con este método debemos calcular la relación entre la longitud empotrada en el estrato de apoyo y la base del pilote

$$R = \frac{L}{B} = \frac{3}{0.50} = 1.50$$

Ahora si $\varphi = 35^\circ$, la relación crítica $\frac{L_c}{B} = 9 = R_2$, por lo tanto

$$R_2 > R_1$$

Ahora

$0.5R_2 = 4.5$, entonces

$$R_1 < 0.5R_2$$

Por lo tanto, se debe utilizar una aproximación lineal entre las curvas, para el valor N'_q

$$N'_q = N_q + (N'_q - N_q) * \frac{R_1}{0.5R_2} = 45 + (110 - 45) * \frac{1.50}{4.5} = 112$$

La densidad promedio se utiliza para todos los métodos:

$$\gamma = \frac{1.4 + 1.7}{2} = \frac{0.77T}{m^3} = 15.5 \text{ kN/m}^3$$

Entonces:

$$q = \gamma * D_f = 0.77 * 5 = 3.85$$

Finalmente, la cohesión es 0 y $\eta=1$, por lo tanto:

$$Q_{pu} = A_p * (\eta * q * N'_q) = 0.19 * 1 * 3.85 * 112 = 81.92T/m^2$$

Método Vesic

La ecuación que propone este método es:

Entonces calculamos el factor $\bar{\sigma}'_0$ = esfuerzo efectivo normal medio del terreno al nivel de la punta del pilote = $\left(\frac{1+2K_0}{3}\right) q'$

$$\bar{\sigma}'_0 = \left[\frac{1 + 2(1 - \sin \phi')}{3}\right] * q' = \left[\frac{1 + 2(1 - \sin 35)}{3}\right] * 15.5 * 5 = 47.86 \text{ kN/m}^2$$

$$\frac{E_s}{P_a} = m$$

Por lo tanto, se asume $m=250$ por ser arena de compacidad media

Entonces,

$$E_s = 250 * 100 = 25000 \text{ kN/m}^2$$

Ahora:

$$\mu_s = 0.1 + 0.3 \left(\frac{\phi' - 25}{20} \right) = 0.1 + 0.3 \left(\frac{35 - 25}{20} \right) = 0.35$$

Y

$$\Delta = 0.005 * \left(1 - \frac{\phi' - 25}{20} \right) \left(\frac{q'}{p_a} \right) = 0.005 * \left(1 - \frac{35 - 25}{20} \right) \left(\frac{15.5 * 5}{100} \right) = 0.0019$$

También

$$I_r = \frac{E_s}{2 * (1 + \mu_s) * q' * \tan \phi'} = \frac{25000}{2 * (1 + 0.25) * (15.5 * 5) * \tan 35} = 184.25$$

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r * \Delta} = \frac{184.25}{1 + 184.25 * 0.0019} = 136.48$$

$$N_q^* = 85$$

$$Q_p = A_p * \bar{\sigma}'_0 * N_q^* = 0.19 * 47.86 * 85 = 772.93 \text{ kN} = 78.82 \text{ T/m}^2$$

Método de Coyle y Castello

$$Q_p = q' N_q^* A_p = (15.5 * 5) * 85 * 0.19 = 1251.63 \text{ kN} = 127.63 \text{ T}$$

Este valor es muy grande a comparación de los métodos anterior, por lo tanto, no se tomar en cuenta en la comparación final.

Método API, para suelos no cohesivos

$$q = \bar{\sigma}_0 * N_q = 47.86 \frac{kN}{m^2} * 20 = 957.32 \frac{kN}{m^2} = 97.62T/m^2$$

Resistencia por punta en suelos no cohesivos (Método USACE)

$$q = \sigma'_v * N_q$$

Entonces tenemos que:

$$D_c = 5B = 5 * .5 = 2.5$$

Por lo tanto:

$$D > D_c$$

Entonces

$$\sigma'_v = \gamma' * D_c = 15.5 * 2.5 = 38.75kN/m^2$$

Ahora:

$$q = \sigma'_v * N_q = \frac{38.75kN}{m^2} * 20 = \frac{775kN}{m^2} = 79.03T/m^2$$

Resistencia por punta (Método FHWA)

El método establecido por la FHWA 88, considera lagunas condiciones para resumir la estimación del cálculo de la capacidad de carga por punta en pilotes:

- La Longitud de pilote debe ser mayor a 4.5 m, y su diámetro mayor a 30 cm.
- En las pruebas de capacidad de carga por punta en pilotes, se debe alcanzar un desplazamiento mínimo del 4 por ciento del diámetro del pilote.
- Los valores de N_{60} no deben ser mayores a 75.

Considerando estas condiciones, tenemos que la capacidad de carga por punta en pilotes es:

$$Q_p = 67 * N_{60} = 67 * 14 = 938 \frac{kN}{m^2} = 95.65 T/m^2$$

Resumen de valores de las estimaciones de capacidad de carga en punta por los diferentes métodos descritos en el capítulo III.

Tabla 15 Resumen de valores de capacidad por carga en punta

Método	Qpunta (T)
SPT	79.03
Meyerhof	81.92
Vesic	78.82
Coyle y Castello	97.62
USACE	79.03
FHWA	95.65

4.1.2.2. Ejemplo práctico 2

Estimación de la capacidad de carga por fuste en pilotes.

Área del pilote

$$A_p = \pi * \frac{\text{diametro}^2}{4} = \pi * \frac{0.5^2}{4} = 0.19m^2$$

Área del fuste del pilote, tomando en cuenta la longitud empotrada en el estrato de cimentación.

$$A_s = \pi * D * L = \pi * 0.5 * 20 = 31.41 m^2$$

Método α

$$f_s = \alpha * c + q' * K * \tan \delta$$

De donde se debe determinar:

$$Q_{su} = A_s[\alpha * c + q' * K * \tan \delta]$$

Ahora obteneros los términos

$$K = K_0 = 1 - \sin \phi = 1 - \sin 28 = 0.53$$

$\delta = 14^\circ$ (pilote metálico en arcilla)

$$c_u = \frac{5T}{m^2} \approx 50kPa$$

Po lo tanto

$$\alpha = 0.75$$

El esfuerzo efectivo a la mitad del pilote que se encuentra empotrado en el estrato de cimentación es:

$$\gamma_w = 1 T/m^3 (\text{peso específico del agua})$$

$$q' = (\gamma_{sat} - \gamma_w) * \frac{h}{2} = (1.5 - 1) * \frac{20}{2} = 5 T/m^3$$

Ahora estimamos la capacidad de carga por fricción superficial del pilote

$$Q_{su} = A_s[\alpha * c + q' * K * \tan \delta] = 31.41 * (0.75 * 5 + 5 * 0.53 * \tan 14^\circ) \\ = 138.54 T$$

Método λ

Longitud de empotramiento = 20 m, por lo tanto, el valor de λ es 0.18, y

$$q' = (\gamma_{sat} - \gamma_w) * \frac{h}{2} = (1.5 - 1) * \frac{20}{2} = 5 T/m^3$$

Ahora

$$f_s = \lambda * (q' + 2 * c_u)$$

Por lo tanto

$$Q_{su} = A_s * \lambda * [q' + 2 * c_u] = 31.41 * 0.18 * [5 + 2 * 5] = 84.80T$$

Método β

$$\beta = K * \tan \delta$$

$\delta = 14^\circ$ (pilote metálico en arcilla)

$$K = 1.3$$

$$\beta = K * \tan \delta = 1.3 * \tan 14^\circ = 0.32$$

$$Q_s = A_s * f_s$$

$$f_s = \beta * q' = 0.32 * 5 = 1.65$$

$$Q_s = A_s * f_s = 31.41 * 1.65 = 51.82T$$

Resumen de valores para la estimación de la capacidad de carga por fuste.

Tabla 16 Resumen de valores de capacidad por fuste de pilotes

Método	Qpunta (T)
α	138.54
λ	84.8
β	51.82

4.1.2.3. Ejemplo práctico 3

Calculo de la capacidad de carga en pilotes

Se muestra un resumen de los diferentes estratos que contiene el perfil del anexo 1, en los cuales se construirá la cimentación piloteada.

Tabla 17

Resumen de datos de la estratigrafía del anexo 1

Estrato	Sección [m]	Profundidad [m]	Clasificación	γ [T/m ³]	ϕ [°]	c [T/m ²]	N SPT
1	3.25	3.25	CH	1.65	-	5.60	10
2	2.85	6.10	CH	1.61	-	5.60	-
3	1.10	7.20	CL	1.64	-	5.60	6
4	4.80	12.00	SM	1.86	33.00	-	19
5	2.70	14.70	CL	1.78	-	7.04	15
6	2.30	17.00	SM	1.83	33.00	-	9
7	2.50	19.50	SM	1.95	33.00	-	18
8	1.50	21.00	SM	2.05	33.00	-	50

Como se indicó en la descripción del ejemplo práctico 3, el pilote tiene una longitud de 19.50 m, y trabaja por punta y por fuste, entonces vamos a proceder con el cálculo de la capacidad del pilote por fuste con diferentes

métodos, cabe aclarar que la aplicación de los métodos descritos en el Capítulo 3 están sujetos a disponibilidad de datos.

Capacidad de resistencia por fuste en el estrato 1 (arcilla)

Método α

$$Q_s = \sum p * \Delta l * f$$

Donde

$$p = \pi * D$$

D= diámetro del pilote = 1m

$$p = \pi * 1 = 3.14m$$

Calculamos la relación:

$$C_u = 5.60 T/m^2$$

$$p_a = 10.20 T/m^2$$

$$\frac{C_u}{p_a} = \frac{5.60}{10.20} = 0.54$$

Con el valor de $\frac{C_u}{p_a}$ en el grafico 23,

$$\alpha = 0.55$$

ahora,

$$f = \alpha * C_u$$

$$f = 0.55 * 5.6 = 3.08$$

con los valores obtenidos, se calcula la capacidad por fricción en el fuste:

$$Q_s = \sum p * \Delta l * f = 3.14 * 3.25 * 3.08 = 31.43 T$$

Método β

Burland (1973), recomienda tomar el valor de 3 para el coeficiente β , ya que es un valor bastante conservador entre 0.24 y 0.32.

$$\beta = 0.30$$

Ahora tenemos que el esfuerzo vertical efectivo

$$\sigma'_v = \gamma * H$$

$$\sigma'_v = 1.65 * 3.25 = 5.36 \text{ T/m}^2$$

Entonces:

$$f = \beta * \sigma'_v$$

$$f = 0.3 * 5.36 = 1.60$$

con los valores obtenidos, se calcula la capacidad por fricción en el fuste:

$$Q_s = \sum p * \Delta l * f = 3.14 * 3.25 * 1.6 = 16.34 \text{ T}$$

Para los estratos subyacente de arcilla, seguimos los mismos pasos, para determinar los valores de resistencia por fricción.

Para los estratos con arena, calculamos la capacidad de carga por fricción superficial con el siguiente método:

Calculo de carga por fricción en arena por el método de Meyerhof para el estrato 5:

$$Q_s = f_{prom} * p * L = (K \bar{\sigma}'_v * \tan \delta) * p * L$$

$$\bar{\sigma}'_v = \frac{4.8 * 18.56}{2} = 44.54 \frac{kN}{m^2}$$

Luego calculamos la relación entre la longitud de empotramiento y el diámetro del pilote:

$$\frac{L}{D} = \frac{4.8}{1} = 4.8$$

Con el valor de $\frac{L}{D}$ y para $\phi=30^\circ$; en la figura 21, tenemos:

$$K = 1.9$$

Y para el valor de

$$\delta = 0.8\phi$$

La resistencia por fricción será:

$$Q_s = (K\bar{\sigma}'_v * \tan \delta) * p * L$$

$$Q_s = (1.90 * 44.54 * \tan(0.8 * 33)) * 3.14 * 4.8 = 633 \text{ kN} = 64.57 \text{ T}$$

Se realizan los cálculos de manera similar para los estratos de arena subyacentes.

Para el estrato de apoyo del pilote, a continuación, se calcula la capacidad de carga en punta por el método de Meyerhof:

$$Q_p = A_p(0.5 * p_a * N_q * \tan \phi)$$

Entonces tenemos que:

$$p_a = 10.20 \text{ T/m}^2$$

Y

$$A_p = \pi * \frac{D^2}{4} = \pi * \frac{1^2}{4} = 0.79 \text{ m}^2$$

También:

Con $\phi=33$ en la figura 17, $N_q = 95$

Entonces:

$$Q_p = A_p(0.5 * p_a * N_q * \tan \phi) = 0.79 * (0.5 * 10.20 * 95 * \tan 33) = 314.44 \text{ T}$$

Capacidad de grupo de pilotes

Son pocos los casos donde los pilotes trabajan solos, es más común tener a grupos de pilotes en las diferentes estructuras con cimentaciones piloteadas.

Para el ejemplo práctico número 3, se ha considerado trabajar con una fila de cuatro pilotes, con separación entre eje de 3 metros.

A continuación, se muestra un resumen de las capacidades por fuste y por punta, calculados con diferentes métodos en la sección anterior.

Tabla 18
Resumen de capacidad de cargas por fuste y punta

Estrato	Material	Sección [m]	Método	Carga [T]
Carga Fricción Fuste				
1	Arcilla, color café algo amarilla con arena fina, plástica, consistencia medianamente compacta	3.25	α	31.45
			β	16.43
2	Arcilla, amarilla algo café, con pintas de arena fina, plástica, consistencia blanda	2.85	α	27.58
			β	12.32
3	Arcilla, limos, color café con arena fina, medianamente plástica, consistencia medianamente compacta	1.10	α	10.64
			β	1.87
4	Arena limosa color gris, con finos no plásticos, compacidad relativa medianamente densa	4.80	Meyerhof	64.55
5	Arcilla, limos, color gris algo verde, con arena fina medianamente plástica, consistencia muy compacta	2.70	α	32.84
			β	12.23
6	Arena limosa color gris, con finos ligeramente plásticos, compacidad relativa medianamente densa	2.30	Meyerhof	14.61
7	Arena limos, color gris, con finos ligeramente plásticos, compacidad relativa medianamente densa	2.50	Meyerhof	19.39
Carga Punta				
8	Arena limos con grava de canto rodado, color gris algo verde, pocos finos no plásticos, compacidad relativa muy densa	1.50	Meyerhof	314.44

Se ha escogido los menores valores para tener datos conservadores y se ha aplicado factores de reducción por fuste y por punta como se indican en el siguiente cuadro resumen:

Tabla 19
Resumen de cargas minoradas para el ejemplo práctico 3

Estrato	Sección [m]	Factor de minoración	Carga [T]	Carga Minorada por pilote [T]
1	3.25	1.2	37.19	30.99
2	2.85	1.2	32.61	27.18
3	1.10	1.2	6.39	5.33
4	4.80	1.3	64.55	49.65
5	2.70	1.2	34.86	29.05
6	2.30	1.3	14.61	11.24
7	2.50	1.3	19.39	14.92
8	1.50	1.3	314.4	241.88

Cálculo de la eficiencia del grupo de pilotes

El ejemplo práctico es la cimentación piloteada del estribo de un puente, con esta condición, generalmente se trabaja con grupos de pilotes. A continuación, se calcula la eficiencia del grupo de pilotes.

El grupo de pilotes estará compuesto por 4 pilotes colocados en fila, teniendo un espaciamiento entre ejes de 3 metros, dando como factores $n_1=4$ y $n_2=1$

Según la norma de Cuba, la eficiencia en suelos granulares con Angulo de fricción mayor a 25° es

$$\frac{S_p}{D} = 3 \text{ entonces } \varepsilon = 0.66$$

$$\frac{S_p}{D} > 7 \text{ entonces } \varepsilon = 1$$

Y siguiendo con el ejemplo práctico se interpola el valor de la eficiencia, ε , para $\phi=33^\circ$ y la relación $S_p/D=3/1=3$

Entonces tenemos que para el estrato 4

$$\phi = 33^\circ$$

$$\frac{S_p}{D} = \frac{3}{1} = 3$$

$$\varepsilon = 0.66$$

Para el estrato 1, suelo arcilloso, se tendrá:

$$\varepsilon = 1 - \frac{1 * [1 * (4 - 1) + 4 * (1 - 1) + \sqrt{2} * (1 - 1) * (4 - 1)]}{\pi * 3 * 4 * 1} = 0.92$$

Luego se tiene que la carga minorada por grupo de pilotes se calcula con:

$$Q_{ug} = \frac{\varepsilon}{\gamma_s} (Q_f^* + Q_p^*)$$

Y el resumen de todos los estratos se presenta a continuación:

Tabla 20
Capacidad de carga en pilotes individuales por grupo

Estrato	Carga Minorada por pilote [T]	ϵ	Factor de minoración	Carga Minorada por grupo [T]
1	12.64	0.92	1.2	9.69
2	9.48	0.92	1.2	7.27
3	1.44	0.92	1.2	1.10
4	49.65	0.66	1.2	27.31
5	9.41	0.92	1.2	7.21
6	11.24	0.66	1.2	6.18
7	14.92	0.66	1.2	8.20
8	241.88	0.66	1.2	133.03
Capacidad total por grupo				200.00

Calculo de la capacidad de pilotes como grupo de pilotes

Se ha utilizado el método de tablas muy práctico en casos que no se poseen información para utilizar otros métodos más elaborados.

Capacidad del pilote trabajando en grupo:

$$Q_{ug} = Q_f + Q_p$$

Carga tomada por el fuste:

$$Q_f = \alpha c_u \phi \pi H$$

Carga tomada por punta

$$Q_p = q_u \phi^2 \frac{\pi}{4}$$

De las tablas se resumen en el siguiente cuadro:

Tabla 21

Resumen del cálculo de capacidad de carga como grupo

Estrato	Clasificación	N SPT	qu [kg/cm2]	α	Qf [T]
1	CH	10	1.28	0.76	49.66
2	CH	8	1.28	0.76	43.55
3	CL	6	0.75	0.88	11.40
4	SM	19	2.5	0.46	86.71
5	CL	15	2	0.55	46.65
6	SM	9	1.1	0.8	31.79
7	SM	18	2.4	0.47	44.30
8	SM	50	4		0.00
Capacidad total por grupo					314.07
Capacidad en Punta=		31.4	T		
Capacidad Total de los Pilotes:		345.47	T		

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones y recomendaciones

- De los métodos estudiados para la estimación de la capacidad de carga en punta, podemos concluir que la capacidad de carga por punta, utilizando el N del SPT tiene mucha similitud con el propuesto por Meyerhof, Vesic y USACE (Us Army Corps of Engineers). La diferencia se debe a la precisión con la que se corrige el N del SPT y la medición de los factores N'_q , en los ábacos propuestos por los diferentes autores.

- La (NEC 2015), en su capítulo de “Geotecnia y Cimentaciones”, sección 8, de Cimentaciones Profundas. Recomienda para la estimación de la capacidad de carga en pilotes, las siguientes metodologías: FHWA (Federal Highway Works Administration of the United States, 1993), Método Lambda Revisado (Vijayvergiya y Focht, 1972), Método API (American Petroleum Institute, 1986, 1987,1993), USACE (Us Army Corps of Engineers, 1991), los mismos que están sujetos a disponibilidad de datos para su uso.

- Además de las metodologías descritas anteriormente, la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 2015), sugiere también utilizar metodologías actuales para el análisis de la capacidad de carga en cimentaciones superficiales y profundas. Estas metodologías deben estar fundamentadas en libros especializados y deben ser utilizados con el mejor criterio posible del ingeniero geotécnico.

- Del ejemplo de cálculo presentado, se puede concluir que la capacidad de carga estimada utilizando correlaciones con el N del SPT, da como resultado capacidades pequeñas en los estratos cohesivos con las arcillas a diferencia de los métodos propuestos por la NEC 2015.
- Todas las ecuaciones estudiadas en este trabajo, son aplicables para estimar la capacidad de carga en pilotes, debemos hacer hincapié en la fiabilidad de los datos con los que se va a calcular para no sobreestimar la capacidad de carga en pilotes.
- La capacidad de carga última en pilotes, incluye el peso del mismo. Se debe tomar en cuenta para obtener la capacidad de carga neta. Se debe restar el peso de pilote de la capacidad de carga última.
- Al determinar la capacidad de carga del pilote, sumando los valores de punta y fuste, se debe emplear con buen criterio un factor de seguridad para el cálculo de la capacidad de carga admisible de pilotes.
- El asentamiento del ejemplo de cálculo de 1.44 mm nos indica que la carga estimada puede dar como resultado un diseño sobredimensionado de pilotes, porque se debe afinar el cálculo.
- En el país se calcula con las correlaciones de Meyerhof para el N del ensayo SPT.

- Es importante tener datos fiables y precisos de las exploraciones en campo, los factores obtenidos en este medio son utilizados en las diferentes ecuaciones de los diferentes métodos. No se deben comprometer estos cálculos con valores poco fiables en los perfiles estratigráficos como en ensayos de laboratorio.
- El criterio en seleccionar el factor de seguridad es importante, ya que si se estima valores menores a la realidad, se puede caer en un sobredimensionamiento de la estructura y por ende en costos elevados de construcción.
- Se recomienda utilizar metodologías recientes ya que como se indicó, las metodologías tradicionales son de hasta más de 30 años de antigüedad como es el caso de Vesic 1977, hay que tomar en cuenta que estos métodos fueron validos en su tiempo por la tecnología que existía

5.2. Bibliografía

Alva, J. (2003). Cimentaciones profundas.

Angel Muelas R. (2006). Manual de Mecánica de Suelos y Cimentaciones.
Mexico.

API. (2000). API RECOMMENDED PRACTICE 2A-WSD (RP 2A-WSD).
Washington D.C.

Bowles, J. E. (1977). FOUNDATION ANALYSIS AND DESIGN. Illinois.

Braja M. Das. (2012). Fundamentos de ingeniería de cimentaciones. Mexico:
Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.

González, E. T. (2001). Ingeniería de Cimentaciones. Mexico DF.

NEC. (2015). Geotécnia y cimentaciones. Quito: Dirección de Comunicación
Social, MIDUVI.

Peck, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H. (1987). Ingeniería de
cimentaciones. Limusa.

POULOS, H. G., & DAVIS, E. H. (1980). Pile foundations analiys and design.
Canadá.

VESIC, A. S. (1977). Design of pile foundations. WASHINGTON D.C.