

Universidad Nacional
Federico Villarreal

Vicerrectorado de
INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DE CAPACIDAD DE CARGA DE PILOTES MEDIANTE MÉTODOS
TEÓRICOS Y SEMIEMPÍRICOS PARA EL DESEMBARCADERO PESQUERO
ARTESANAL DE CERRO AZUL, CAÑETE**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

AUTORA:

GAVIDIA PINEDO, LOURDES MILAGROS

ASESOR:

MS. AYBAR ARRIOLA, GUSTAVO ADOLFO

JURADO:

DR. CANCHO ZÚÑIGA, GERARDO ENRIQUE

MS. GARCÍA URRUTIA OLAVARRIA, ROQUE JESÚS LEONARDO

MS. TABORY MALPARTIDA, GUSTAVO AUGUSTO

LIMA – PERÚ

2019

DEDICATORIA

A mis padres Lourdes y Moisés, por su amor y paciencia. Por ser un buen ejemplo de superación y por el apoyo constante que me brindan.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por hacer posible este logro.

Al Ing. Gustavo Aybar Arriola, mi asesor de tesis, por guiarme en el desarrollo de este trabajo de investigación.

Al Ing. Juan Sánchez Guando, por sus enseñanzas sobre la mecánica de suelos e incentivarnos a conocer más de este campo.

Al Ing. Ismael Arturo Tupia Mendizábal, por sus enseñanzas, información y recomendaciones para la elaboración de esta tesis.

A Lourdes, Moisés, Angel, Félix y Jonathan, porque su presencia en mi vida me motiva y ayuda a alcanzar objetivos.

A mis familiares y amigos, porque de diferentes maneras aportaron en el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| DEDICATORIA..... | ii |
| AGRADECIMIENTOS | iii |
| RESUMEN..... | ix |
| ABSTRACT | x |
| I. INTRODUCCIÓN | 11 |
| 1.1 Descripción y formulación del problema | 13 |
| Problema general | 13 |
| Problemas específicos | 13 |
| 1.2 Antecedentes | 14 |
| 1.3 Objetivos..... | 19 |
| Objetivo general | 19 |
| Objetivos específicos..... | 19 |
| 1.4 Justificación | 20 |
| 1.5 Hipótesis | 20 |
| II. MARCO TEÓRICO..... | 21 |
| 2.1 Bases teóricas sobre pilotes | 21 |
| 2.2 Información previa al estudio de mecánica de suelos | 22 |
| 2.3 Condiciones en las que se emplean pilotes..... | 23 |
| 2.4 Clasificación de pilotes | 25 |
| 2.4.1 Por el material que lo forma | 25 |
| 2.4.2 Por su construcción | 29 |
| 2.4.3 Por la forma como transmite la carga al suelo..... | 31 |
| 2.5 Capacidad de carga de un pilote | 32 |
| 2.6 Métodos de cálculo de capacidad de carga..... | 35 |
| 2.6.1 Métodos Teóricos | 38 |
| 2.6.2 Métodos Semiempíricos | 44 |
| III. METODO | 48 |
| 3.1 Tipo de investigación | 48 |
| 3.2 Ámbito temporal y espacial | 48 |
| 3.3 Variables..... | 49 |
| 3.4 Población y muestra | 50 |

| | |
|----------------------------------|----|
| 3.5 Instrumentos..... | 51 |
| 3.6 Procedimientos | 51 |
| 3.7 Análisis de datos | 56 |
| IV. RESULTADOS..... | 58 |
| 4.1 Métodos Teóricos..... | 58 |
| 4.2 Métodos Semiempíricos | 62 |
| V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 67 |
| VI. CONCLUSIONES | 71 |
| VII. RECOMENDACIONES | 73 |
| VIII. REFERENCIAS..... | 74 |
| IX. ANEXOS | 76 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Cimentaciones Profundas | 21 |
| Figura 2: Condiciones en las que se emplean pilotes..... | 24 |
| Figura 3: Longitud y cargas máximas según tipo de pilotes | 25 |
| Figura 4: Pilotes convencionales de concreto armado | 26 |
| Figura 5: Hincado de pilotes prefabricados de concreto | 29 |
| Figura 6: Ejecución de pilotes con barrena continua | 30 |
| Figura 7: Pilotes según forma de transmisión de carga..... | 31 |
| Figura 8: Distribución simplificada de la carga a lo largo del pilote | 33 |
| Figura 9: Distribución simplificada de la carga a lo largo del pilote en estratos duros | 34 |
| Figura 10: Distribución simplificada de la carga a lo largo del pilote en estratos blandos | 34 |
| Figura 11: Modelos de rotura para un pilote. | 36 |
| Figura 12: Configuración geométrica | 37 |
| Figura 13: Variación de q_p con respecto a la longitud de empotramiento..... | 38 |
| Figura 14: Valores de $Nq *$ | 39 |
| Figura 15: Resistencia unitaria por fuste..... | 42 |
| Figura 16: Ubicación del proyecto Desembarcadero Pesquero Artesanal Cerro Azul | 49 |
| Figura 17: Procedimiento de la investigación | 52 |
| Figura 18: Ensayo de penetración estándar SPT | 54 |
| Figura 19: Capacidad de carga por punta Q_p Método Teórico Meyerhof | 58 |
| Figura 20: Capacidad de carga por punta Q_p Método Teórico ROM..... | 59 |
| Figura 21: Capacidad de carga por fuste Q_f Método Teórico Meyerhof | 60 |
| Figura 22: Capacidad de carga por fuste Q_f Método Teórico ROM..... | 61 |
| Figura 23: Capacidad de carga por punta Q_p Método Semiempírico Meyerhof | 62 |
| Figura 24: Capacidad de carga por punta Q_p Método Semiempírico ROM | 63 |
| Figura 25: Capacidad de carga por fuste Q_f Método Semiempírico Meyerhof..... | 64 |
| Figura 26: Capacidad de carga por fuste Q_f Método Semiempírico ROM | 65 |

| | |
|--|----|
| Figura 27: Capacidad de carga por fuste Q_f por diferentes formulaciones | 67 |
| Figura 28: Capacidad de carga por punta Q_p por diferentes formulaciones | 68 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Valores interpolados de Nq *..... | 40 |
| Tabla 2 Formulaciones del método teórico y método semiempírico | 50 |
| Tabla 3: Valores N60 del ensayo SPT | 56 |
| Tabla 4: Valores de ángulo de fricción | 57 |
| Tabla 5: Capacidad de carga por punta Q_p Método Teórico Meyerhof..... | 58 |
| Tabla 6: Capacidad de carga por punta Q_p Método Teórico ROM..... | 59 |
| Tabla 7: Capacidad de carga por fuste Q_f Método Teórico Meyerhof | 60 |
| Tabla 8: Capacidad de carga por fuste Q_f Método Teórico ROM..... | 61 |
| Tabla 9: Capacidad de carga por punta Q_p Método Semiempírico Meyerhof | 62 |
| Tabla 10: Capacidad de carga por punta Q_p Método Semiempírico ROM..... | 63 |
| Tabla 11: Capacidad de carga por fuste Q_f Método Semiempírico Meyerhof | 64 |
| Tabla 12: Capacidad de carga por fuste Q_f Método Semiempírico ROM | 65 |
| Tabla 13: Valores de capacidad de carga por fuste Q_f expresado en toneladas | 66 |
| Tabla 14: Valores de capacidad de carga por punta Q_p expresado en toneladas..... | 66 |
| Tabla 15: Valores de capacidad de carga por fuste Q_f expresado en porcentaje..... | 68 |
| Tabla 16: Valores de capacidad de carga por punta Q_p expresado en porcentaje | 69 |
| Tabla 17: Valores de capacidad de carga por fuste Q_f a 2.25m de profundidad | 71 |
| Tabla 18: Valores de capacidad de carga por punta Q_p a 6.30m de profundidad | 72 |

RESUMEN

En esta investigación se realiza una evaluación de capacidad de carga de pilote hincado calculado mediante formulaciones teóricas y semiempíricas, aplicadas al caso práctico del Desembarcadero Pesquero Artesanal de Cerro Azul en Cañete. Existe una gran cantidad de metodologías de cálculo de capacidad de carga en la literatura científica, dentro de ellas se ha elegido dos métodos aplicables a suelos granulares y pilotes hincados para el desarrollo de este trabajo: El método teórico y el método semiempírico, usando las formulaciones de Meyerhof y las de la norma española Recomendaciones geotécnicas para Obras Marítimas y portuarias ROM 0.5-05. Se analizan y comparan estas metodologías, cualitativa y cuantitativamente. Finalmente se concluye que los valores de capacidad de carga obtenidos mediante métodos semiempíricos son mayores que a los del método teórico, variando hasta en un 35%, y se recomienda emplear al menos una formulación teórica y otra semiempírica para verificar los datos de entrada y resultados.

Palabras clave: Pilote, capacidad de carga.

ABSTRACT

This research is about an evaluation of the load capacity of the driven pile calculated by means of theoretical and semi-empirical formulations, applied to the practical case of the Artisanal Fishing Landing of Cerro Azul in Cañete. There is a large amount of load capacity calculation methodologies in the scientific literature, within which two methods applicable to granular soils and driven piles have been chosen for the development of this work: The theoretical method and the semi-empirical method, using the formulations of Meyerhof and those of the Spanish norm Geotechnical Recommendations for Maritime and Port Works ROM 0.5-05. These methodologies are analyzed and compared, qualitatively and quantitatively. Finally, it is concluded that the load capacity values obtained by semi-empirical methods are greater than those of the theoretical method, varying up to 35%, and it is recommended to use at least one theoretical and semi-empirical formulation to verify the input data and results.

Keywords: Pile, load capacity.

I. INTRODUCCIÓN

Los pilotes son cimentaciones profundas que permiten transmitir cargas a estratos de suelo más resistentes y evitan grandes deformaciones en el terreno. Una de sus aplicaciones es como cimentación de desembarcaderos pesqueros artesanales, construcciones portuarias importantes que permiten el desarrollo económico y social de las ciudades.

Los primeros pilotes en usarse en la historia fueron de madera, estos eran colocados en grandes cantidades para asegurar una mayor capacidad de carga, sin embargo con el desarrollo industrial aparecieron pilotes de concreto y acero, y con ello la necesidad de optimizar la cantidad de pilotes a utilizar, es así que se desarrollan formulaciones para estimar la capacidad de carga, y a medida que el tiempo transcurre estas teorías se amplían y mejoran. Actualmente, existen diversas ecuaciones en la literatura científica las cuales se encuentran en libros especializados, normas, manuales, tesis, etc.

La capacidad de carga se calcula mediante fórmulas aceptadas en el campo de la mecánica de suelos (E.050 Suelos y cimentaciones, 2018). En el Perú la población está concentrada en la costa y también la mayoría de edificaciones, las cuales usualmente se solucionan mediante cimentación superficial gracias al tipo de suelo que tenemos. Pero para construcciones portuarias debemos usar cimentaciones profundas, con las que estamos menos familiarizados y cuyos mecanismos de transferencia de carga son distintos. Y ante un gran abanico de fórmulas aceptadas por la mecánica de suelos, surge la interrogante de cuál elegir y con qué criterio.

En esta investigación se realiza una evaluación de capacidad de carga de pilotes hincados calculados mediante formulaciones del método teórico y semiempírico, aplicadas al caso práctico del Desembarcadero Pesquero Artesanal de Cerro Azul en Cañete. Con la finalidad de desarrollar un proceso adecuado de cálculo de capacidad de carga aplicable también a otros proyectos similares.

Los parámetros de suelo que se usan son los de la costa de Cerro Azul en Cañete, obtenidos de investigaciones anteriores y verificadas en febrero del año 2018 junto a la empresa Tupia Ingenieros SAC. Las formulaciones elegidas para ser evaluadas, considerando el suelo granular y pilotes hincados, son las de Meyerhof y las de la norma española Recomendaciones geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias ROM 0.5-05, ambas incluyen fórmulas teóricas y empíricas. Se analizan las cargas transmitidas por fuste y por punta del pilote, y se compara los resultados obtenidos mediante gráficos.

Finalmente se concluye que los valores de capacidad de carga obtenidos mediante métodos semiempíricos son mayores que a los del método teórico, variando hasta en un 35%. Se recomienda el uso de al menos una formulación de cada método a manera de verificación de los cálculos.

1.1 Descripción y formulación del problema

Problema general

¿Qué diferencias hay entre los métodos teóricos y semiempíricos para el cálculo de capacidad de carga de pilotes para el desembarcadero pesquero artesanal de Cerro Azul, Cañete?

La normativa peruana no determina un procedimiento específico para el cálculo de capacidad de carga de pilotes para obras portuarias, por lo que se puede incurrir al error en los cálculos que generaría problemas técnicos y económicos en el proyecto. Se requiere mayor orientación en la elección de métodos para calcular la capacidad de carga de pilotes.

En la literatura científica existen diversas fórmulas para el cálculo de capacidad de carga de pilotes en general, esta información debe ser seleccionada, analizada y comparada. Se debe comprender el enfoque de cada fórmula a utilizar para el correcto empleo de la misma. También son factores influyentes, el criterio ingenieril y la experiencia del profesional en temas de cimentaciones profundas.

Problemas específicos

- ¿Cuáles son las diferencias entre los métodos teóricos y semiempíricos para el cálculo de capacidad de carga por fuste de pilotes para el desembarcadero pesquero artesanal de Cerro Azul, Cañete?
- ¿Cuáles son las diferencias entre los métodos teóricos y semiempíricos para el cálculo de capacidad de carga por punta de pilotes para el desembarcadero pesquero artesanal de Cerro Azul, Cañete?

1.2 Antecedentes

Según Fuentes (2001), la imprecisión de las metodologías existentes conlleva a que el cálculo de capacidad de carga de cimentaciones profundas sea uno de los problemas más complejos dentro del campo de la mecánica de suelos.

Son pocas las investigaciones sobre pilotes e infraestructura portuaria en nuestro país, además el suelo es un medio complicado por su heterogeneidad, varían también el procedimiento constructivo y material del pilote; siendo así complejo el cálculo de la capacidad de carga. Dentro de los métodos de cálculo tenemos métodos teóricos y semi-empíricos, resalta de este último su representatividad de propiedades del suelo; existe la necesidad de ajustar las metodologías a características locales a través de más investigaciones. Lo mencionado se refleja en los siguientes antecedentes:

A nivel nacional tenemos los siguientes estudios:

Ninanya (2018), realiza el trabajo *Evaluación de la capacidad de carga de pilotes excavados en arcillas a través de métodos estáticos y pruebas de carga*, en la Universidad Ricardo Palma; la investigación tiene como objetivo comparar los resultados de la capacidad de carga de pilotes ubicados en Perú, Brasil y Kuwait obtenidos por métodos estáticos y ensayos de carga, se analizan pilotes excavados ubicados en suelos finos y arena; el estudio concluye que el uso de métodos que consideren efectos particulares del tipo de suelo en el que se trabaja, mejora los valores de capacidad de carga obtenidos, como es el caso de la fricción negativa de los suelos arcillosos, las diferencias entre métodos usados varían para los diferentes casos de estudio por las condiciones de suelo particulares de cada lugar.

Barrantes (2017), realiza el trabajo *Tecnología para cimentaciones por pilotaje en proyectos de Ingeniería Civil*, en la Universidad Nacional Federico Villarreal, la investigación tiene como objetivo estudiar edificaciones cimentadas con pilotes en nuestro país para dar una propuesta que disminuya el riesgo de fallas de estas edificaciones, se consideran diferentes tipos de suelos y pilotes de materiales y procesos constructivos distintos; el estudio concluye que el empleo de pilotes en la cimentación permite un mayor desarrollo de edificaciones en terrenos antes no considerados, la propuesta tecnológica permite mitigar las fallas de las cimentaciones y lograr edificaciones estables, no existen suficientes estudios de cimentaciones profundas y existe la necesidad de modernizar la industria de cimentaciones profundas en el Perú.

Pizarro y Romero (2017), realizan el trabajo *Análisis comparativo de asentamientos y capacidades de carga evaluados y esperados en pilotes perforados en los puentes Fortaleza y Crisnejas*, en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas; el objetivo de esta investigación es comparar los asentamientos y capacidad de carga de pilotes de puentes ubicados en Lima y Cajamarca, para analizar estos pilotes perforados emplea métodos teóricos y ensayos de carga; en las conclusiones señala que en general los valores obtenidos de asentamientos y capacidad de carga por métodos teóricos son más conservadores que los obtenidos por ensayos de carga, la variación entre los resultados obtenidos por estos dos métodos es menor en los pilotes cuya punta se apoya en un estrato granular y es mayor la variación cuando la punta se encuentra en un estrato de suelo cohesivo, como recomendación señala la necesidad de capacitación profesional en temas de ensayo de carga y una mayor implementación en la normativa peruana sobre cimentaciones profundas con pilotes.

Rodríguez y Torpoco (2015), realizan el trabajo *Manual de construcción e instalación de pilotes según la práctica de empresas especializadas en el Perú*, en la Pontificia Universidad Católica del Perú; el objetivo de esta investigación es desarrollar un documento que sirva en la orientación de cimentaciones con pilotes, que ayude a determinar un proceso constructivo adecuado según las condiciones particulares de cada proyecto, para esto investiga a cinco empresas que operan en el Perú, los tipos de pilotes más utilizados y el tipo de terreno para los que son aptos; en las conclusiones señala que además de las teorías mencionadas en la investigación, la experiencia del ingeniero a cargo es de gran importancia, ya que el comportamiento del suelo es difícil de predecir con exactitud por ser un material no homogéneo, el documento desarrollado brinda criterios para elegir el tipo de pilote, proceso constructivo, maquinaria a emplear según las propiedades del suelo, disposición geométrica y solicitud de cargas, señala la importancia de ensayos de control de calidad como la prueba de carga e integridad y el aporte de las cimentaciones con pilotes para el desarrollo de la infraestructura.

Eyzaguirre (2014), realiza el trabajo *Diseño y construcción de un muelle para embarque de minerales*, en la Universidad Nacional de Ingeniería; el objetivo de esta investigación es proponer un diseño de muelle de embarque de minerales en la ciudad de Trujillo y describir su proceso descriptivo; en las conclusiones describe detalles del diseño del muelle y su presupuesto estimado, también señala que existen proyectos que no se aprueban debido a que no se formulan acorde con la normativa vigente.

A nivel internacional tenemos los siguientes estudios:

Quinga (2017), realiza el trabajo *Metodología para el cálculo de la capacidad de carga en pilotes, basado en la Norma Ecuatoriana de la Construcción*, en la Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador; el objetivo es analizar las metodologías propuestas por la Norma Ecuatoriana de Construcción para determinar la capacidad de carga de pilotes, aplicar las metodologías con datos propios de áreas en Ecuador para contrastar resultados; dentro de las conclusiones señala que la capacidad de carga obtenida por método semiempírico son valores menores en comparación a los métodos de la Norma Ecuatoriana de construcción, recomienda que los valores de ingreso a las formulaciones sean confiables para evitar sobredimensionamiento de los pilotes y mayores costos.

León (2017), realizó el trabajo *Estudio comparativo de las metodologías de Poulos, Meyerhof y CCP14 de cálculo de carga última para pilotes pre excavados en suelos granulares y comparación de los resultados con cinco pruebas de carga*, en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia; el objetivo del proyecto es comparar capacidades de carga obtenidas por métodos teóricos y ensayo de carga para pilotes en suelos colombianos, se analizan pilotes excavados de concreto en suelos arenosos; el trabajo concluye que de los métodos teóricos empleados, el método CCP14 es el que obtiene valores más cercanos de capacidad de carga al de los ensayos de carga, además recomienda en afectar por los coeficientes de corrección necesarios a los datos obtenidos por el ensayo de penetración estándar SPT.

Camargo (2016) realiza el trabajo *Análisis de distintos procedimientos para el cálculo de la carga de hundimiento de pilotes*, en la Universidad Politécnica de Madrid, España; el objetivo del proyecto es analizar metodologías de cálculo de capacidad de carga de normativas de España y Colombia aplicadas en edificaciones, obras portuarias y carreteras, comparar los resultados obtenidos y adicionalmente realizar ensayos de sensibilidad; dentro de las conclusiones señala que las normas analizadas emplean formulaciones similares aunque con diferentes coeficientes y límites máximos de resistencias unitarias y capacidades de carga; recomienda la realización de análisis de sensibilidad de los valores de entrada de las formulaciones y la ejecución de ensayos de carga.

Polo (2013), realizó el trabajo *Dimensionamiento de cimentaciones profundas mediante pilotes, aplicación a la autovía noroeste de Murcia*, en la Universidad Politécnica de Madrid, España; el objetivo del proyecto es comparar metodologías de cálculo de capacidad de carga de pilotes propuestas por la normativa española usadas en edificaciones, obras portuarias y carreteras, el caso práctico que se desarrolla son pilotes empleados para viaductos, para los cuales se varía el tipo de suelo y proceso de instalación de los pilotes, de esta manera tener un análisis más amplio; dentro de las conclusiones señala que hay una gran variedad de formulaciones propuestas para estimar la capacidad de carga de pilotes, en el caso de métodos teóricos y semiempíricos parten de datos de laboratorio e *in situ*, los cuales deben ser lo más representativos posibles para ello se deben seguir las especificaciones técnicas de cada ensayo, las formulaciones deben usarse según las condiciones particulares de cada proyecto, recomienda la ejecución de ensayos de carga porque permite obtener valores más reales.

Barreto (2011), realizó el trabajo *Evaluación comparativa de la capacidad de carga en cimentaciones profundas, fórmulas analíticas y ensayos de carga*, en la Universidad Nacional de Colombia; este trabajo tiene por objeto comparar los valores de capacidad de carga de pilotes obtenidos por ensayos de carga, métodos teóricos y formulaciones propuestas por la normativa colombiana, la cimentación profunda estudiada son pilotes hincados de concreto; concluye que por las variaciones de resultados obtenidos por métodos teóricos y ensayos de carga, existe una necesidad de ajustar las formulaciones a las condiciones propias de cada proyecto y territorio, resalta el ensayo de carga como proceso importante en la verificación de las capacidades de carga de los pilotes, la investigación permitió establecer diferencias entre la capacidad de carga por punta y por fuste, para pilotes que desarrollen ambas recomienda usar factores de seguridad distintos en cada uno, para el caso de pilotes apoyados en roca, la metodología de Meyerhof es el que obtuvo valores más cercanos al de los ensayos de carga, finalmente señala que no hay formulación universal para el cálculo de capacidad de carga de pilotes debido a las diferentes condiciones de cada proyecto.

1.3 Objetivos

Objetivo general

Evaluar la capacidad de carga de pilotes obtenidos mediante métodos teóricos y métodos semiempíricos para el desembarcadero pesquero artesanal de Cerro Azul, Cañete.

Objetivos específicos

- Calcular la capacidad de carga *por fuste* de pilotes mediante métodos teóricos y métodos semiempíricos para el desembarcadero pesquero artesanal de Cerro Azul, Cañete.
- Calcular la capacidad de carga *por punta* de pilotes mediante métodos teóricos y métodos semiempíricos para el desembarcadero pesquero artesanal de Cerro Azul, Cañete.

- Analizar las diferencias entre el método teórico y el método semiempírico en el cálculo de capacidad de carga de carga de pilotes para el desembarcadero pesquero artesanal de Cerro Azul, Cañete.

1.4 Justificación

El Perú es un país con un extenso litoral, donde la implementación y mejora de la infraestructura portuaria es fundamental para el desarrollo socio-económico tanto a nivel local como nacional. Las cimentaciones de estas estructuras están constituidas básicamente por pilotes, por ello es importante realizar investigación sobre métodos de cálculo de capacidad de carga de estos pilotes, como parte del diseño geotécnico.

1.5 Hipótesis

Evaluando adecuadamente la capacidad de carga de pilotes podemos realizar diseños óptimos de cimentaciones profundas en infraestructuras portuarias.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Bases teóricas sobre pilotes

Los pilotes son elementos estructurales que están clasificados dentro de las cimentaciones profundas. Se consideran cimentaciones profundas cuando la profundidad es mayor que cinco veces el ancho de la cimentación (E.050 Suelos y cimentaciones, 2018).

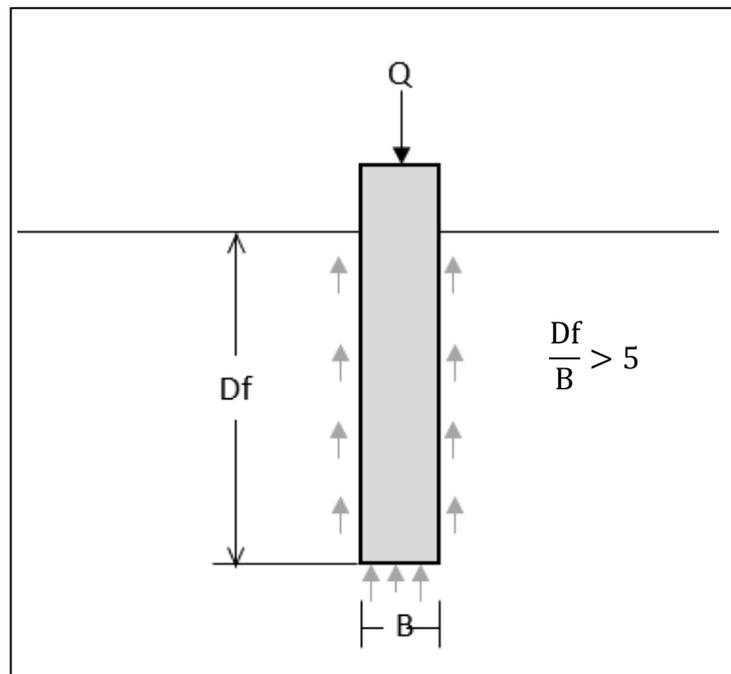


Figura 1: Cimentaciones Profundas

Fuente: Elaboración propia

Los pilotes son elementos estructurales esbeltos de diámetro menor o igual a 0.90 m., que transmiten la carga a estratos inferiores mediante fricción lateral y/o su apoyo en punta; de manera análoga a cómo trabaja un clavo. Su uso busca garantizar la capacidad de soporte de la estructura y limitar los asentamientos. Pueden ser de madera, concreto o acero; prefabricado o construido in situ; e instalarse mediante hincado o excavación. La sección transversal puede ser circular, cuadrada, hexagonal u octogonal.

Según Alva (2011), el uso de pilotes es una de las técnicas más antiguas para cimentar en suelos blandos, inicialmente eran todos de madera, luego con el desarrollo industrial y demanda de estructuras pesadas surgen los pilotes de concreto y posteriormente los de acero; recalca también que para comprender su comportamiento, es necesario conocer todos los tipos de pilotes y los métodos de instalación.

Soportan principalmente cargas verticales, pero también cargas horizontales, fricción negativa, empujes laterales y esfuerzos de corte del suelo. Generalmente la capacidad lateral de un pilote es pequeña a diferencia de la capacidad vertical.

Usualmente se emplean distribuidos dentro de un área o alineados, dependiendo del tipo de estructura que soportan.

La aplicación de pilotes la encontramos en cimentaciones de edificios, puentes, terraplenes, caminos, estructuras marítimas, torres de transmisión, edificaciones cuya cimentación está debajo del nivel freático.

2.2 Información previa al estudio de mecánica de suelos

De acuerdo con la norma E.050 Suelos y Cimentaciones, en proyectos con cimentaciones profundas es obligatorio la realización de un Estudio de Mecánica de Suelos, la información previa para este estudio puede provenir de diversas fuentes:

- Información publicada; como normativas, documentos geológicos y geotécnicos, fotografías aéreas, cartas marinas, estudios de proyectos próximos al área de estudio.
- Información no publicada; como investigación local en el área de estudio, información sobre el uso pasado del suelo, industrias o construcciones que se puedan afectar.
- Reconocimiento de campo, inspección del área de estudio, contrastar los documentos geológicos y geotécnicos y demás información mediante sondeos.

La información preliminar necesaria para el estudio de mecánica de suelos, que deben ser obtenidos por el ingeniero responsable, son los siguientes:

- Del área a explorar; plano de ubicación, plano topográfico y/o plano batimétrico señalando la ubicación del proyecto, características de obras cercanas al proyecto, accesos, permiso de ingreso al área de estudio.
- Del proyecto a cimentar; se considera el uso del proyecto, nivel de piso terminado, área del proyecto, tipo de estructura, distancia entre elementos estructurales, cargas.
- Información general del área; información de uso anterior del suelo, obras anteriores que se deban tener en cuenta.
- De las edificaciones cercanas; magnitud de la edificación, tipo de cimentación y su actual estado de conservación.
- Información adicional; información relevante que incida en la capacidad portante o deformaciones en el suelo.

A partir de estas informaciones previas se programan los trabajos de exploración geotécnica como parte del estudio de mecánica de suelos.

2.3 Condiciones en las que se emplean pilotes

- Estratos superiores blandos o flojos que no tienen la capacidad para soportar la carga de la estructura. Los pilotes transmiten la carga a estratos más profundos y resistentes, como roca o suelos más densos y menos compresibles que los superficiales.
- La cimentación superficial no alcanza los estratos firmes, debido a que tiene que atravesar agua y/o aire, como es el caso de estructuras marítimas.
- Impedimento de realizar cimentaciones superficiales, ya sea por razones técnicas y/o económicas.

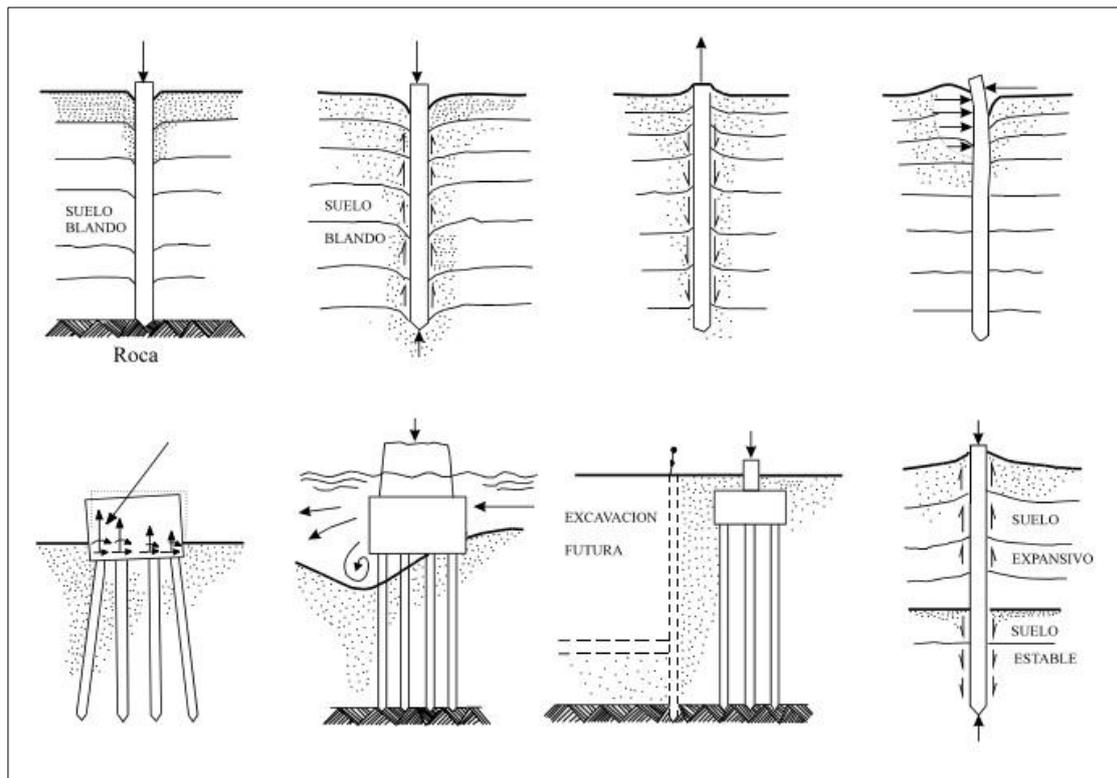


Figura 2: Condiciones en las que se emplean pilotes

Fuente: Alva (2011)

- Necesidad de limitar los asentamientos de la estructura en suelos compresibles o donde pueda haber grandes asentamientos diferenciales.
- Necesidad de elementos de contención en procesos constructivos.
- Probabilidad de licuación de suelos.
- Presencia de suelos colapsables.
- Presencia de suelos expansivos.
- Presencia de suelos susceptibles a erosión.
- Cargas elevadas y concentradas.
- Fuerzas de levantamiento en la cimentación.
- Fenómeno de fricción negativa.
- Fuerzas horizontales y de volteo en la cimentación.
- Inestabilidad de taludes.

- Necesidad de mejorar las condiciones físicas del terreno mediante compactación de terrenos granulares.

2.4 Clasificación de pilotes

Según Fuentes (2001), los pilotes varían en material, proceso constructivo, formas, tamaños, entre otros criterios de acuerdo a los requerimientos de cada proyecto. Los pilotes se clasifican según diferentes parámetros.

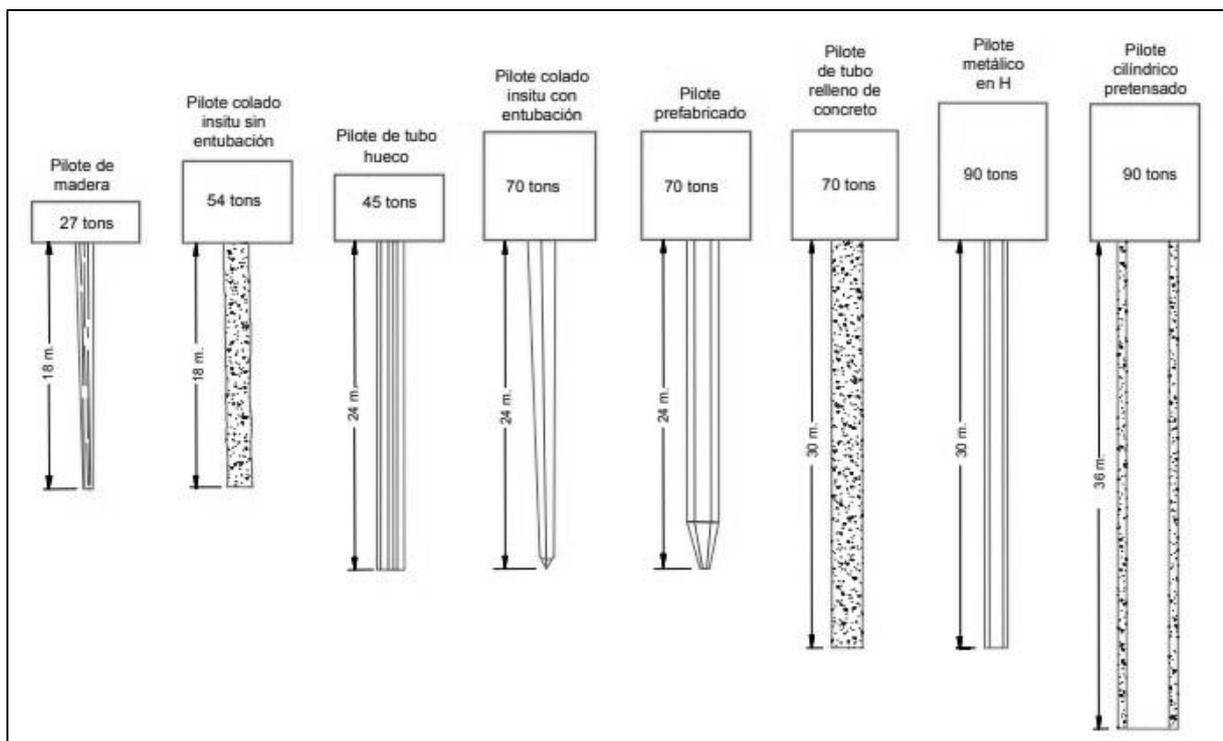


Figura 3: Longitud y cargas máximas según tipo de pilotes

Fuente: Alva (2011)

2.4.1 Por el material que lo forma

Pilotes de acero

Los pilotes de aceros son usados para grandes solicitudes de carga, soportan fuertes hincados en el proceso constructivo, penetran fácilmente en los estratos de suelo, tienen alta resistencia a la tracción y flexión, pueden alcanzar longitudes grandes por medio de empalmes

y soldaduras. Sus principales desventajas son su costo elevado y la susceptibilidad a la corrosión, para lo cual se puede revestir el pilote o realizar un tratamiento catódico en caso de medios agresivos, como exposición a sales. Entre los pilotes de acero están los perfiles I, perfiles H y pilotes tubulares.

Entre los perfiles, el tipo H es el más solicitado. Su sección permite atravesar estratos de suelo con mayor facilidad que los otros tipos de perfiles. Los pilotes tubulares pueden hincarse con su extremo abierto y llenarse con el suelo natural, o soldar diferentes tipos de punta y quedar huecos o rellenarse de concreto.

Pilotes de concreto

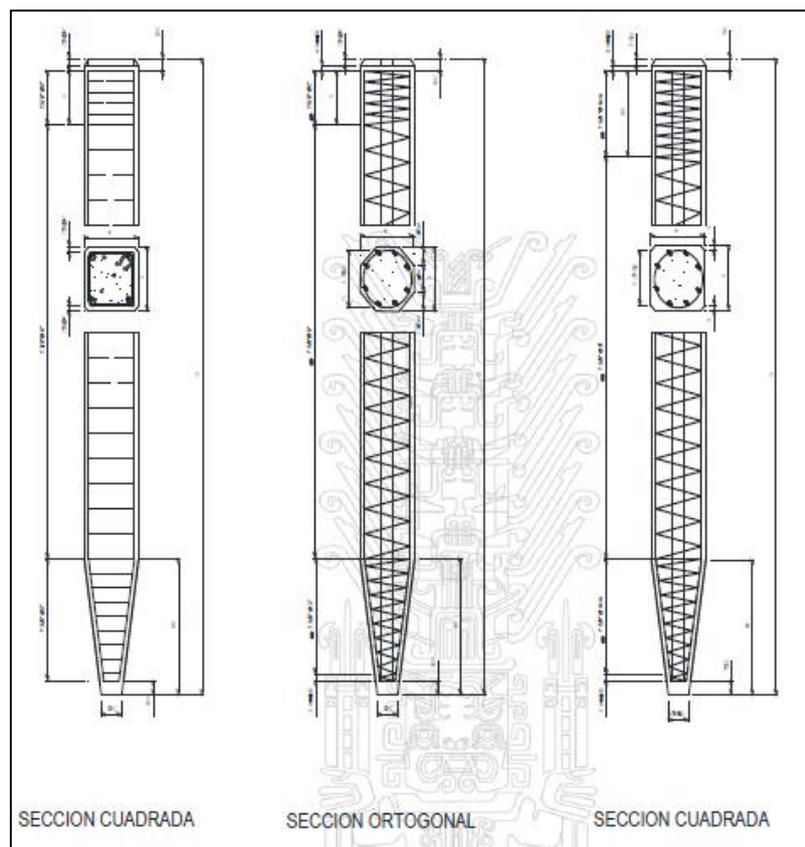


Figura 4: Pilotes convencionales de concreto armado

Fuente: Barrantes (2017)

Los pilotes de concreto surgieron como resultado del desarrollo industrial a inicios de siglo XX, necesarios para las nuevas construcciones de mayores cargas que anteriormente eran soportados por pilotes de madera. El cemento Portland tipo V le da resistencia ante agentes agresivos como sales. Son más baratos que los pilotes de acero. Pueden ser prefabricados o fabricados in situ.

Los pilotes prefabricados tienen capacidad de soporte máximo de 75 toneladas, pueden reforzarse con barras de acero en su interior por método convencional o pretensado el cual ayuda a la disminución de grietas, su sección transversal puede ser circular, cuadrada, octogonal, etc. Son empleados en estructuras como desembarcaderos. Su transporte, manipuleo, corte requieren un mayor cuidado y tiempo que los pilotes de acero. Son más baratos que los pilotes fabricados in situ.

Los pilotes fabricados in situ pueden llevar funda, el cual es un elemento metálico hueco de paredes delgadas que se hincan en el terreno y luego se llena de concreto, formando parte del pilote; o la funda puede ser retirada a medida que se realiza el vaciado de concreto, de esta manera los costos se reducen. Los pilotes fabricados in situ no sufren daños por manipuleo o hincado, pueden soportar hasta 150 toneladas de capacidad de carga, su base se puede ensanchar para aumentar la capacidad de soporte.

Pilotes de madera

Fueron los primeros tipos de pilotes usados en la antigüedad, constituían cimentaciones económicas, pero dependen de la formación de los árboles, por lo tanto existen limitaciones en cuanto a su dureza, longitud y sección. Sus ventajas son su fácil manipulación, resistencia al hincado, resistencia a la flexión. Son empleados tanto para cimentar edificaciones como también montajes provisionales de construcción ya que su resistencia a la tracción permite que

se puedan extraer fácilmente y ser reutilizados. Soportan hasta 27 toneladas, y su longitud promedio está entre 12 y 18 metros.

Debido al hincado, las partes más susceptibles a dañarse son la punta y cabeza del pilote, además a lo largo del pilote se produce un aplastamiento en las fibras. Otro problema al que se enfrenta la madera es al ataque de insectos, pudrimiento, exposición al fuego, entre otros. Los pilotes de madera pueden ser tratados con productos químicos y reforzados con otros materiales como metal y concreto para aumentar su vida útil y capacidad de carga.

Rodríguez y Torpoco (2015), señalan que es común el uso de pilotes de madera en la selva de nuestro país, donde se dispone de diferentes variedades de este material, además de que sus suelos están constituidos en su mayoría por arcilla, limo y arena; por lo que es conveniente el uso de este tipo de cimentación.

Pilotes compuestos

También llamados pilotes mixtos, están formados por dos o más materiales. Se utilizan en terrenos con condiciones especiales, como presencia de estratos competentes a mayores profundidades, parte del pilote se encuentra sumergido en agua o expuesto agentes agresivos.

Las combinaciones más comunes son madera-concreto y acero-concreto. Permite aprovechar las ventajas de cada material, el bajo costo y fácil manipuleo de la madera, la durabilidad del concreto y el hincado fuerte al que se le puede someter al acero. Pueden estar conformados también por otros materiales a manera de recubrimiento, como un forro plástico. La más grande dificultad de los pilotes compuestos es formar uniones apropiadas entre los diferentes materiales, motivo por el cual no son muy usados.

2.4.2 Por su construcción

1. Pilotes hincados

La instalación de estos pilotes se realiza por medio de martillos y vibradores. Los pilotes prefabricados pueden ser de madera, concreto o acero. Constituyen una buena alternativa en terrenos inestables. Permiten alcanzar grandes profundidades. Los pilotes hincados pueden generar superficies fácilmente por encima del nivel de terreno, como se requiere en estructuras marítimas. Previo al hincado, la integridad del pilote puede ser inspeccionada, sin embargo, el proceso constructivo debe ser cuidadoso para evitar daños estructurales.

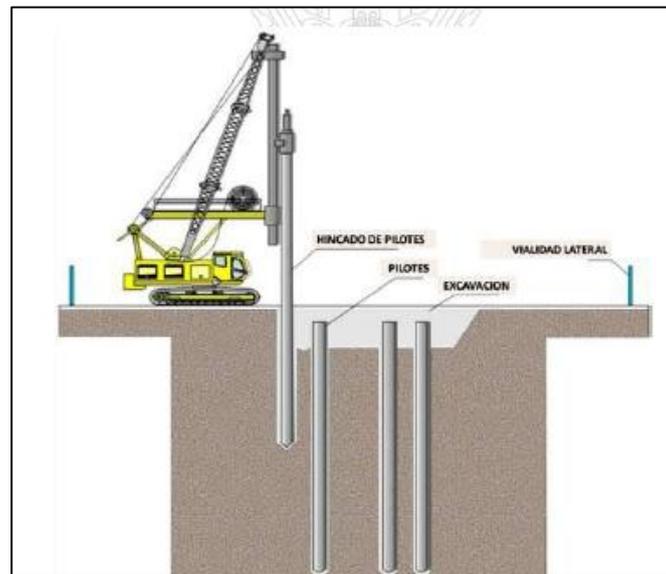


Figura 5: Hincado de pilotes prefabricados de concreto

Fuente: Barrantes (2017)

2. Pilotes hincados y vaciados *in situ*

Consiste en hincar una sección hueca de acero para luego ser rellena de concreto. La sección de acero, también llamada camisa, puede ser removida o no al final del proceso constructivo. Evita el flujo del agua durante el fraguado del concreto. Evita el izaje y manipuleo necesario en el hincado de elementos prefabricados.

3. Pilotes excavados

Se realizan por excavación o perforación, extrayendo un volumen de suelo para luego construir o colocar el pilote en el espacio generado. El pilote puede ser de concreto vaciado *in situ*, también puede ser prefabricado de acero o concreto. Para estabilizar la excavación se puede utilizar camisas metálicas o fluidos como lodos bentoníticos. La excavación podría aflojar los suelos granulares.

Una técnica más desarrollada de este tipo de pilotes consiste en inyectar el concreto a presión, de tal manera que el concreto ingrese en los vacíos del terreno, aumenta la densidad y la fricción entre suelo y pilote, por ende la capacidad de carga es mucho mayor.

4. Pilotes con barrena continua

Este procedimiento se utiliza en suelos como arena y arcilla, sin presencia de bolonerías que puedan dañar la maquinaria. Se perfora el suelo con una barrena helicoidal, una vez que se alcanza la profundidad requerida, se realiza el vaciado de concreto a medida que la barrena se va retirando. La armadura de acero del pilote es colocada después del vaciado del concreto con ayuda de un vibrador. Permite disminuir el tiempo de ejecución.

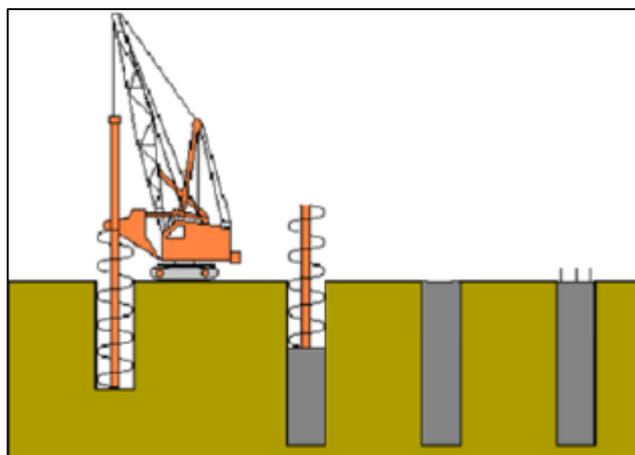


Figura 6: Ejecución de pilotes con barrena continua

Fuente: Pizarro y Romero (2017)

2.4.3 Por la forma como transmite la carga al suelo

1. Pilotes de fricción

Pilotes en suelos blandos, transmiten la carga por medio del rozamiento del fuste y el terreno. La carga depende del diámetro del pilote, la fuerza aplicada y la resistencia del suelo.

2. Pilotes de punta

Pilotes que se prolongan hasta un estrato duro o roca de gran espesor. La carga se transmite de la superficie hasta el estrato duro por medio de la punta. La carga depende de la resistencia del estrato sobre el que se apoyan.

3. Pilotes de fricción y punta

El pilote atraviesa más de un estrato. En la parte superior suelos blandos y en la parte inferior un estrato duro. Se desarrolla la transmisión de carga por punta y por fuste, sin embargo, debe de considerarse para el cálculo de capacidad de carga, que la transmisión por punta requiere un mayor desplazamiento del pilote que la transmisión por fuste.

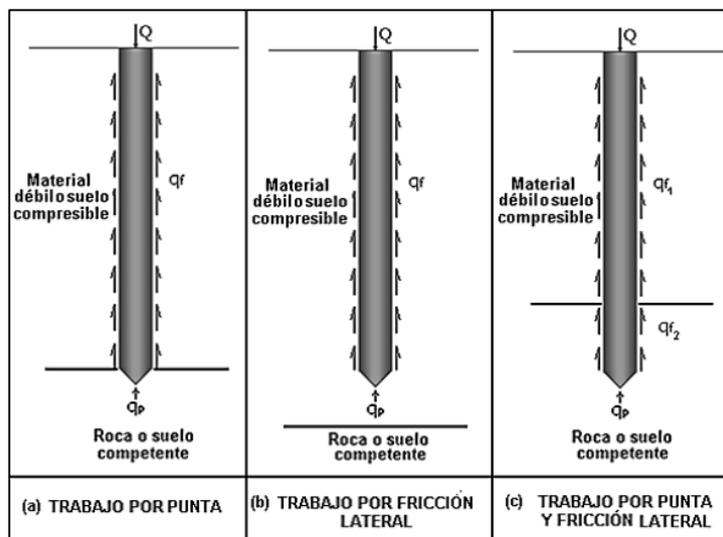


Figura 7: Pilotes según forma de transmisión de carga

Fuente: Barreto (2011)

2.5 Capacidad de carga de un pilote

Es la presión máxima que soporta el suelo sin que falle por corte. La capacidad de carga se calcula por medio de fórmulas aceptadas y valores obtenidos por pruebas de mecánica de suelos (E.050 Suelos y cimentaciones, 2018).

Para el cálculo de la capacidad de carga última no se consideran estratos de suelos de resistencia muy baja, suelos susceptibles a licuefacción o erosión, ni turbas. Para suelos cohesivos se considera un ángulo de fricción interna igual a cero, para suelos granulares se considera una cohesión igual a cero. El análisis de capacidad de carga se realiza para un pilote aislado o un grupo de pilote de acuerdo a la separación entre pilotes y el tipo de suelo en el que se está cimentando. Se debe considerar efectos parásitos que puedan disminuir la capacidad de carga como la fricción negativa, el cual se presenta en suelos arcillosos debido al asentamiento por el proceso de consolidación.

Por el mecanismo de transferencia de carga de los pilotes, su capacidad de carga puede corresponder a la capacidad de carga por punta, a la capacidad de carga por fuste o a la suma de estos.

$$Q_u = Q_p + \sum Q_f$$

Donde:

Q_u : Capacidad última del pilote

Q_p : Capacidad última por punta del pilote

$\sum Q_f$: Capacidad última por fuste, por los estratos que intervienen en el efecto de fricción.

El cálculo de la resistencia por punta y por fuste se determina separadamente, sin embargo estos mecanismos de transferencia están interrelacionados a través del asentamiento producido en el suelo, el cual depende los estratos que atraviesa el suelo y sus propiedades. Para la estimación del asentamiento se considera la deformación axial del pilote, el asentamiento del suelo a nivel de la punta y el asentamiento generado por la fricción entre el suelo y el fuste del pilote.

En la figura 8, el pilote atraviesa estratos no muy resistentes por lo que la mayor parte de la carga es transmitida por el fuste y solo una parte por la punta. La mayor capacidad total se dará con un mayor asentamiento, cuando la capacidad de punta también se desarrolle por completo.

$$Q_u = Q_p + \sum Q_f$$

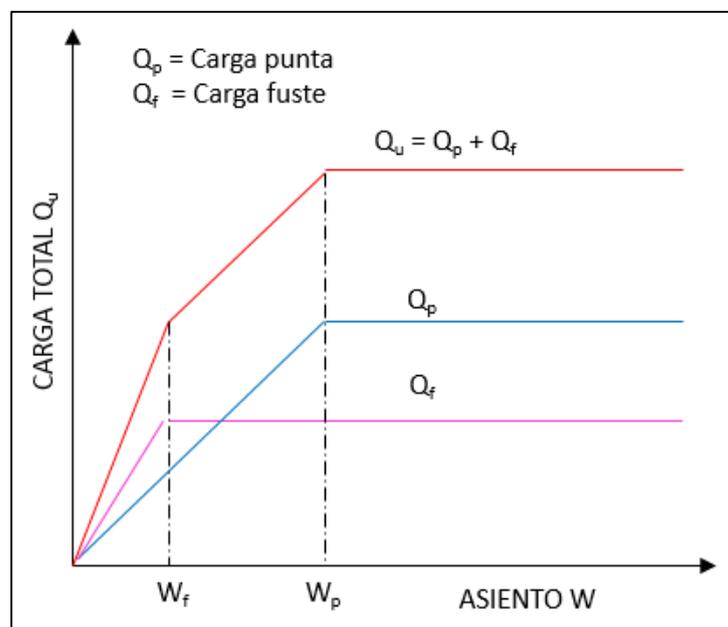


Figura 8: Distribución simplificada de la carga a lo largo del pilote

Fuente: Elaboración propia

La capacidad de carga por fuste es muy pequeña en presencia de estratos duros y compactos, donde básicamente la capacidad de carga de punta constituye la capacidad de carga última del pilote.

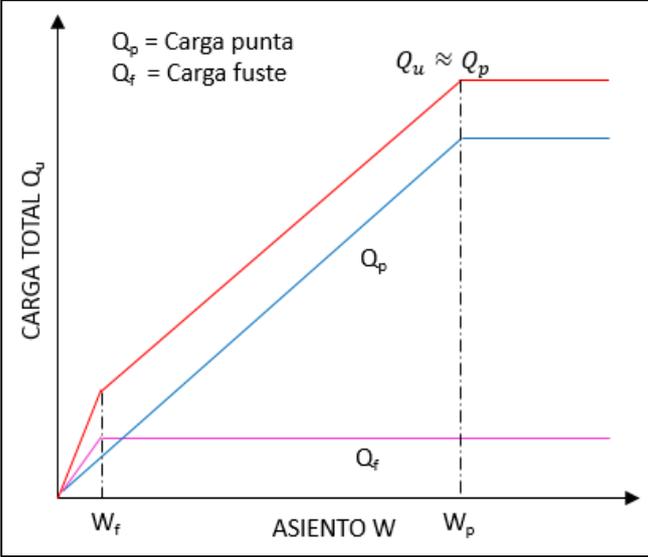


Figura 9: Distribución simplificada de la carga a lo largo del pilote en estratos duros

Fuente: Elaboración propia

Mientras que en presencia de estratos blandos, la capacidad de carga por punta es pequeño y es la capacidad de carga por fuste la que representa la capacidad de carga última del pilote.

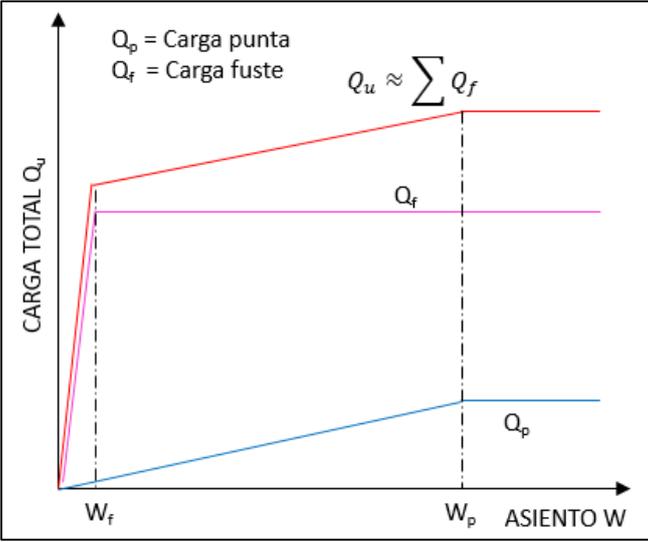


Figura 10: Distribución simplificada de la carga a lo largo del pilote en estratos blandos

Fuente: Elaboración propia

2.6 Métodos de cálculo de capacidad de carga

En la formulación general, la resistencia unitaria por fuste y la resistencia unitaria por punta pueden ser calculadas por distintos métodos, según el tipo de pilote, tipo de terreno y modelo que se considere.

$$Q_u = Q_p + \sum Q_f$$

$$Q_u = q_p \cdot A_p + \sum q_f \cdot A_f$$

Donde:

Q_u : Capacidad última del pilote

Q_p : Capacidad última por punta del pilote

$\sum Q_f$: Capacidad última por fuste, por los estratos que intervienen en el efecto de fricción.

q_p : Resistencia unitaria por la punta

A_p : Área de la punta

q_f : Resistencia unitaria por fuste en cada tramo

A_f : Área de fuste en cada tramo

Diversos autores han propuesto modelos de rotura del terreno para un pilote sometido a cargas verticales. Camargo (2016), señala que actualmente el modelo de plastificación aceptado para cimentaciones profundas es el de Meyerhof.

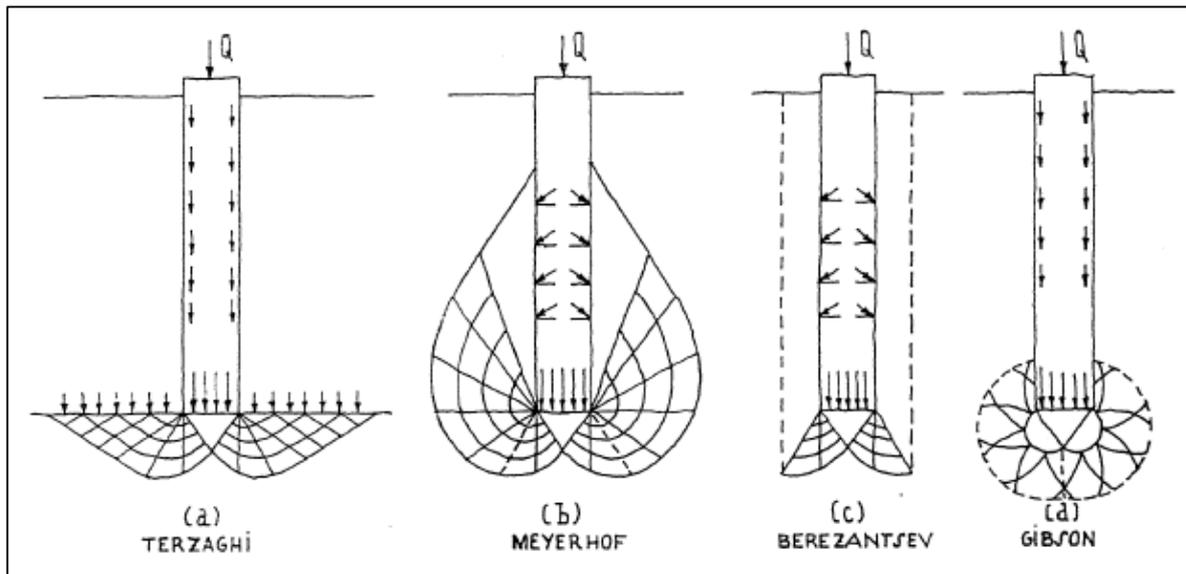


Figura 11: Modelos de rotura para un pilote.

Fuente: Polo (2013)

Los cálculos de la capacidad de carga del pilote dependen también de la configuración geométrica del pilote, en especial de la longitud enterrada y del diámetro. En caso se trate de un pilote no circular, para calcular el diámetro equivalente se hace una comparación a un pilote circular de igual perímetro o de igual área.

Se debe conocer la configuración del terreno a mayor profundidad que la longitud de empotramiento estimada, debido a que el efecto de las cargas a las que se somete el pilote alcanza mayores profundidades. De acuerdo con las Recomendaciones geotécnicas para Obras Marítimas ROM 0.5-05, a nivel de la punta, en el área de rotura del terreno, se diferencia una zona activa y una zona pasiva, estas se estiman según el tipo del terreno, la zona activa es la inferior al nivel de punta y se estima como 2 veces el diámetro en terrenos cohesivos, la zona pasiva superior, 4 veces el diámetro. Para suelos granulares los valores de la zona activa y pasiva se estiman como 3 y 6 veces el diámetro respectivamente.

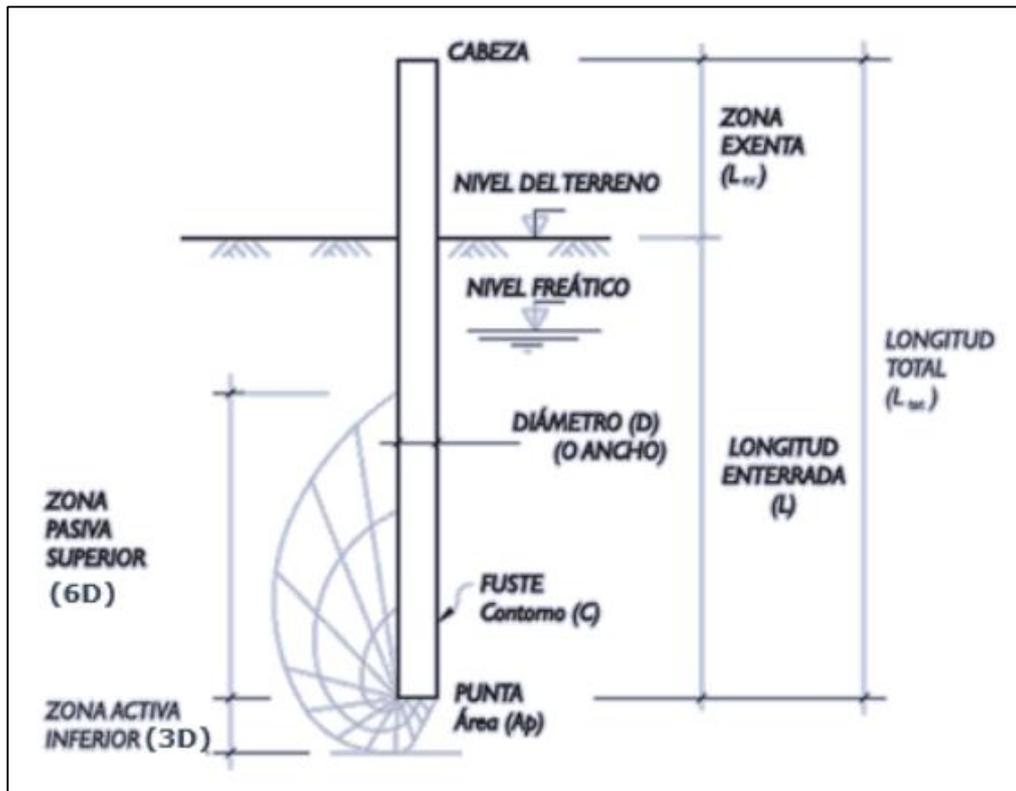


Figura 12: Configuración geométrica

Fuente: Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y portuarias

Dentro de los métodos aplicables para el cálculo de la capacidad de carga tenemos:

Métodos teóricos; se basan en la teoría de la plasticidad, se calcula la capacidad por punta y por fuste de un pilote por medio de formulaciones analíticas propuestas por diferentes autores en función a propiedades de resistencia del suelo.

Métodos semiempíricos; se basan en ensayos de campo como el ensayo de penetración estándar SPT, penetrómetro dinámico, penetrómetro estático, entre otros. Se establece una correlación entre estos ensayos y la capacidad de carga del pilote.

Pruebas de carga; parten de ensayos a escala real del pilote, este método es el más acertado, sin embargo la realización de los ensayos son costosos y requieren de mayor tiempo. Los ensayos de carga pueden ser estáticos o dinámicos.

2.6.1 Métodos Teóricos

Se presentan formulaciones analíticas para el cálculo de capacidad de carga de punta y fuste según Meyerhof y según las Recomendaciones geotécnicas para Obras Marítimas y portuarias (ROM 0.5-5). Se consideran las formulaciones para suelo granular.

Formulación de Meyerhof para estimar capacidad de carga por punta

La capacidad de carga por punta en suelos granulares aumenta a mayor longitud de empotramiento hasta volverse constante al alcanzar una longitud de empotramiento crítica estimada en 16 o 18 veces el diámetro del pilote.

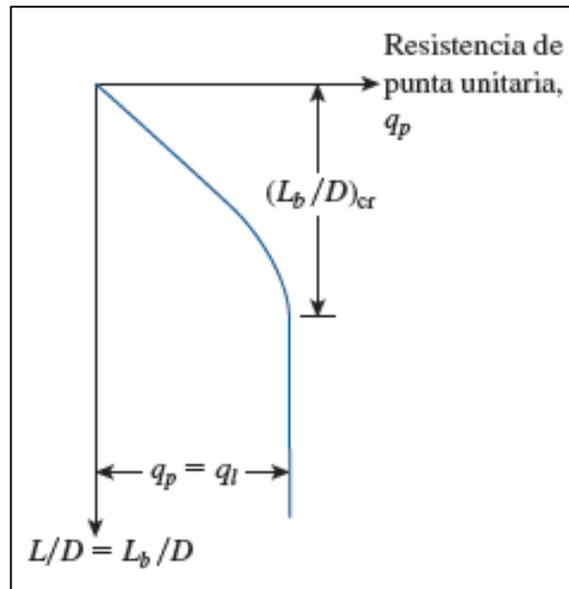


Figura 13: Variación de q_p con respecto a la longitud de empotramiento

Fuente: Fundamentos de ingeniería de cimentaciones (2012)

Formulación de Meyerhof para estimar capacidad de carga por punta en suelos granulares:

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

$$q_l = 0.05 \cdot N_q^* \cdot \tan \varphi$$

Donde:

Q_p : Capacidad última por punta del pilote

A_p : Área de la punta (m²)

q' : Presión vertical efectivo (MN/m²)

N_q^* : Factor de capacidad de carga

q_l : Resistencia unitaria por la punta para una longitud de empotramiento crítica (MN/m²)

φ : Ángulo de fricción (°)

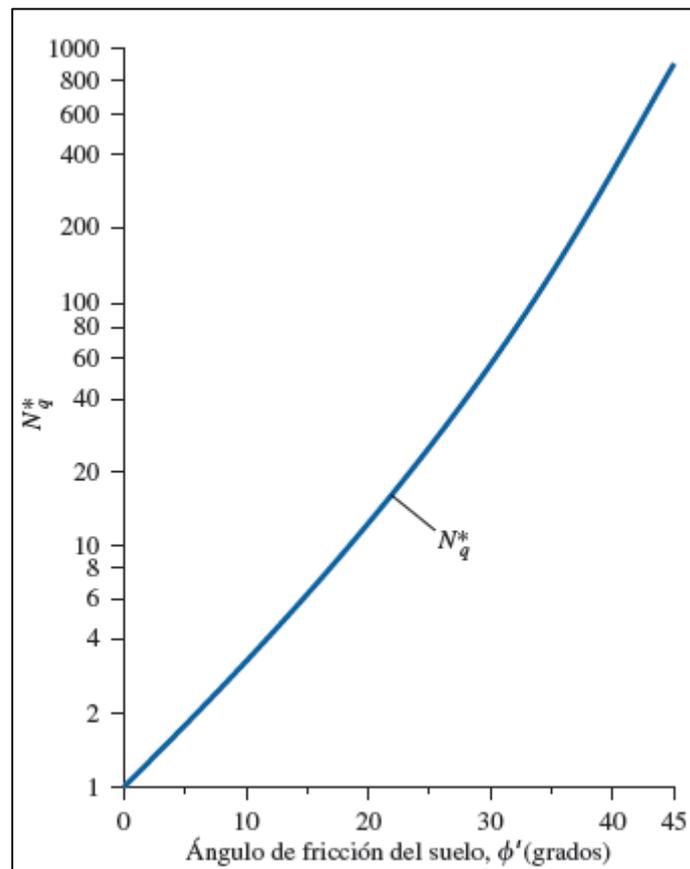


Figura 14: Valores de N_q^*

Fuente: Fundamentos de ingeniería de cimentaciones (2012)

Tabla 1 Valores interpolados de N_q^*

Fuente: Fundamentos de ingeniería de cimentaciones (2012)

| 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 | 26.0 |
| 26 | 29.5 |
| 27 | 34.0 |
| 28 | 39.7 |
| 29 | 46.5 |
| 30 | 56.7 |
| 31 | 68.2 |
| 32 | 81.0 |
| 33 | 96.0 |
| 34 | 115.0 |
| 35 | 143.0 |
| 36 | 168.0 |
| 37 | 194.0 |
| 38 | 231.0 |
| 39 | 276.0 |
| 40 | 346.0 |
| 41 | 420.0 |
| 42 | 525.0 |
| 43 | 650.0 |
| 44 | 780.0 |
| 45 | 930.0 |

Formulación ROM para estimar capacidad de carga por punta

Formulación considerada para suelos granulares en las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y portuarias:

$$Q_p = q_p \cdot A_p$$

$$q_p = 3 \cdot q' \cdot N_q \cdot f_D \leq 20 \text{ MN/m}^2$$

Donde:

Q_p : Capacidad última por punta del pilote

q_p : Resistencia unitaria por la punta (MN/m²)

A_p : Área de la punta (m²)

q' : Presión vertical efectivo (MN/m²)

φ : Ángulo de fricción (°)

N_q : Factor de capacidad de carga definido por la expresión:

$$\frac{1 + \operatorname{sen}\varphi}{1 - \operatorname{sen}\varphi} \cdot e^{\pi \cdot \tan\varphi}$$

f_D : Factor de corrección por tamaño del pilote

$$f_D = 1 - \frac{D}{D_0} > 0.7$$

D : Diámetro del pilote (m)

D_0 : Diámetro de referencia = 3m

La capacidad de carga aumenta a mayor profundidad hasta alcanzar una longitud crítica de empotramiento L_a y se vuelve constante, a partir de esta longitud se considera como resistencia unitaria por punta la correspondiente a esta profundidad.

$$L_a = D \cdot \sqrt{N_q}$$

Donde:

L_a : Longitud crítica de empotramiento (m)

D : Diámetro del pilote (m)

N_q : Factor de capacidad de carga

Para el caso de pilotes hincados, el cálculo se realiza como se ha descrito anteriormente, en caso de pilotes excavados se multiplica por un factor de reducción de 0.5, esto debido a la pérdida de confinamiento del suelo producto de la excavación.

Formulación de Meyerhof para estimar capacidad de carga por fuste

La capacidad de carga por fuste aumenta a mayor profundidad hasta llegar a una longitud de empotramiento crítica estimada entre 15 a 20 diámetros del pilote, a partir del cual debe considerarse como resistencia unitaria por fuste la correspondiente a la longitud de empotramiento crítico.

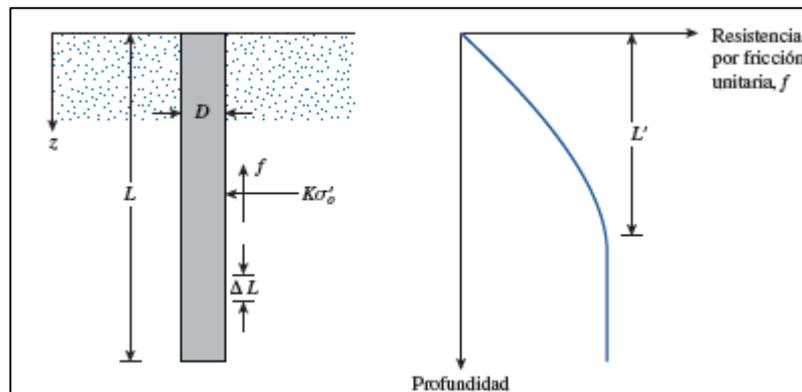


Figura 15: Resistencia unitaria por fuste

Fuente: Fundamentos de ingeniería de cimentaciones (2012)

Formulación de Meyerhof para estimar capacidad de carga por fuste en suelos granulares:

$$Q_f = \sum q_f \cdot A_f$$

$$q_f = K \cdot q' \cdot \tan \delta$$

Donde:

Q_f : Capacidad última por fuste, por los estratos que intervienen en el efecto de fricción.

q_f : Resistencia unitaria por fuste en cada tramo (KN/m²)

A_f : Área de fuste en cada tramo (m²)

K : Coeficiente efectivo de presión de tierra. Mansur y Hunter (1970), obtuvieron empíricamente valores de K según tipos de pilotes:

Pilotes H : $K=1.65$

Pilotes de tubo de acero : $K=1.26$

Pilotes de concreto : $K=1.5$

q' : Esfuerzo vertical efectivo (KN/m²)

φ : Ángulo de fricción (°)

δ : Ángulo de fricción suelo – pilote, comprendido en el intervalo de $0.5 \cdot \varphi$ a 0.8φ

Formulación ROM para estimar capacidad de carga por fuste

$$Q_f = \sum q_f \cdot A_f$$

$$q_f = q' \cdot K \cdot f \cdot \tan \varphi$$

Donde:

Q_f : Capacidad última por fuste, por los estratos que intervienen en el efecto de fricción.

q_f : Resistencia unitaria por fuste en cada tramo (KN/m²)

A_f : Área de fuste en cada tramo (m²)

q' : Esfuerzo vertical efectivo (KN/m²)

K : Coeficiente de empuje empírico, según su el proceso constructivo del pilote:

Pilotes hincados : $K=0.75$

Pilotes perforados : $K=0.5$

f : Factor de reducción del rozamiento del fuste, depende del material y proceso constructivo del pilote:

Pilotes de concreto in situ o de madera : $f=1$

Pilotes prefabricados de concreto : $f=1$

Pilotes de acero : $f=0.9$

φ : Ángulo de fricción ($^{\circ}$)

La resistencia unitaria por fuste se limita a 125KN/m² para pilotes hincados y a 90KN/m² para pilotes excavados.

2.6.2 Métodos Semiempíricos

Se presentan formulaciones basadas en el ensayo de penetración estándar SPT para el cálculo de capacidad de carga de punta y fuste según Meyerhof y según las Recomendaciones geotécnicas para Obras Marítimas y portuarias (ROM 0.5-5). Se consideran las formulaciones para suelo granular.

Formulación de Meyerhof para estimar capacidad de carga por punta

La capacidad de carga por punta en suelos granulares obtenida con la formulación de Meyerhof, aumenta a mayor longitud de empotramiento hasta que su resistencia unitaria de fuste alcanza su valor límite de $0.4 \cdot N_{60prom} MN/m^2$.

$$Q_p = q_p \cdot A_p$$

$$q_p = 0.04 \cdot N_{60prom} \cdot \frac{L}{D} \leq 0.4 \cdot N_{60prom} MN/m^2$$

Donde:

Q_p : Capacidad última por punta del pilote

q_p : Resistencia unitaria por la punta (MN/m²)

A_p : Área de la punta (m²)

N_{60prom} : Valor medio del número de penetración estándar entre la zona activa y la zona pasiva a nivel de la punta del pilote. Los valores de N60 no deben ser mayores de 50.

L : Longitud de empotramiento del pilote (m)

D : Diámetro del pilote (m)

Formulación ROM para estimar capacidad de carga por punta

Formulación considerada para suelos granulares en las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y portuarias:

$$Q_p = q_p \cdot A_p$$

$$q_p = \alpha \cdot N_{60prom}$$

$$\alpha = \left(0.1 + \frac{D_{50}}{D_r} \right) \cdot f_D \leq 0.4$$

$$f_D = 1 - \frac{D}{D_0} > 0.7$$

Donde:

Q_p : Capacidad última por punta del pilote

q_p : Resistencia unitaria por la punta (MN/m²)

A_p : Área de la punta (m²)

α : número adimensional según tipo de terreno y diámetro de pilote

N_{60prom} : Valor medio del número de penetración estándar entre la zona activa y la zona pasiva a nivel de la punta del pilote. Los valores de N_{60} no deben ser mayores de 50.

D_{50} : Tamaño medio de la curva granulométrica de las arenas (mm)

D_r : Tamaño de referencia, se considera 2mm.

f_D : Factor de corrección por tamaño del pilote

D : Diámetro del pilote (m)

D_0 : Diámetro de referencia = 3m

Para el caso de pilotes hincados, el cálculo se realiza como se ha descrito anteriormente, en caso de pilotes excavados se multiplica por un factor de reducción de 0.5, esto debido a la pérdida de confinamiento del suelo producto de la excavación.

Formulación de Meyerhof para estimar capacidad de carga por fuste

Diferencia los pilotes hincados según el desplazamiento de suelo que genera por su proceso constructivo y la incidencia que tiene en la compactación del terreno. Los pilotes de alto desplazamiento son de punta cerrada y sección circular o cuadrada, los de bajo desplazamiento tienen el extremo de punta abierto, secciones irregulares como I, H.

$$Q_f = \sum q_f \cdot A_f$$

Pilotes hincados de alto desplazamiento: $q_f = 2 \cdot N_{60}$ (KN/m²)

Pilotes hincados de bajo desplazamiento: $q_f = N_{60}$ (KN/m²)

Donde:

Q_f : Capacidad última por fuste, por los estratos que intervienen en el efecto de fricción.

q_f : Resistencia unitaria por fuste en cada tramo (KN/m²)

A_f : Área de fuste en cada tramo (m²)

N_{60} : Valor del número de penetración estándar en cada tramo. Los valores de N_{60} no deben ser mayores de 50.

Formulación ROM para estimar capacidad de carga por fuste

Formulación considerada para suelos granulares y pilotes hincados en las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y portuarias:

$$Q_f = \sum q_f \cdot A_f$$

$$q_f = 2.5 \cdot N_{60} \text{ (KN/m}^2\text{)}$$

Donde:

Q_f : Capacidad última por fuste, por los estratos que intervienen en el efecto de fricción.

q_f : Resistencia unitaria por fuste en cada tramo (KN/m²)

A_f : Área de fuste en cada tramo (m²)

N_{60} : Valor del número de penetración estándar en cada tramo. Los valores de N_{60} no deben ser mayores de 50.

Para el caso de pilotes metálicos se multiplica por un factor de reducción de 0.90, y si el pilote es excavado se le afecta por un factor de 0.75.

III. METODO

3.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada ya que se basa en resolver un problema práctico, el cálculo de la capacidad de carga de pilotes para el Desembarcadero Pesquero Artesanal en el distrito de Cerro Azul, Cañete. Este tipo de investigación se orienta a problemas actuales, los problemas se desarrollan en un contexto específico cuyas soluciones obedecen a dicho contexto, generalmente implica un proceso deductivo y se analiza la viabilidad de las soluciones.

El diseño de investigación es experimental, se manipula la variable independiente métodos de cálculo de capacidad de carga para pilotes y se analiza la variable dependiente magnitud de la capacidad de carga de pilote obtenida por las formulaciones de los métodos teóricos y semiempíricos.

3.2 Ámbito temporal y espacial

El proyecto del Desembarcadero Pesquero Artesanal Cerro Azul, para cuyos pilotes se realiza el cálculo de capacidad de carga en esta investigación, se ubica en el litoral del Distrito de Cerro Azul, perteneciente a la provincia de Cañete, Departamento de Lima en la costa central del Perú. Se analiza el pilote proyectado en las coordenadas 8559986N, 339078E.

El reconocimiento de campo y ejecución de ensayos para verificar los parámetros de suelo se realizaron en el año 2018 con la empresa de ingeniería geotécnica Tupia Ingenieros SAC, además se cuenta con información previa del proyecto Desembarcadero Pesquero Artesanal Cerro Azul que data del 2017.



Figura 16: Ubicación del proyecto Desembarcadero Pesquero Artesanal Cerro Azul

Fuente: Google Earth

3.3 Variables

Variable independiente

Método de cálculo de capacidad de carga de pilote, es una variable de tipo cualitativa. Se evalúan formulaciones del método teórico y el método semiempírico para el cálculo de capacidad de carga por punta y fuste del pilote. Camargo (2016), señala que actualmente el modelo de plastificación aceptado para cimentaciones profundas es el de Meyerhof, además su teoría es ampliamente desarrollada; Meyerhof es la primera fuente de formulaciones para este trabajo, la segunda es una normativa española específica para infraestructura portuaria, Recomendaciones geotécnicas para Obras Marítimas ROM 0.5-05.

Tabla 2 Formulaciones del método teórico y método semiempírico

Fuente: Recopilación propia

| N | Método | Autor/Fuente | Capacidad de carga | Expresión General |
|---|--------------|--------------|--------------------|--|
| 1 | Teórico | Meyerhof | Por punta | $Q_p = q_p \cdot A_p = A_p \cdot q' \cdot N_q^* \leq A_p \cdot q_l$ $q_l = 0.05 \cdot N_q^* \cdot \tan \varphi$ |
| 2 | Teórico | ROM | Por punta | $Q_p = q_p \cdot A_p$ $q_p = 3 \cdot q' \cdot N_q \cdot f_D \leq 20MN/m^2$ |
| 3 | Teórico | Meyerhof | Por fuste | $Q_f = \sum q_f \cdot A_f$ $q_f = K \cdot q' \cdot \tan \delta$ |
| 4 | Teórico | ROM | Por fuste | $Q_f = \sum q_f \cdot A_f$ $q_f = q' \cdot K \cdot f \cdot \tan \varphi$ |
| 5 | Semiempírico | Meyerhof | Por punta | $Q_p = q_p \cdot A_p$ $q_p = 0.04 \cdot N_{60prom} \cdot \frac{L}{D} \leq 0.4 \cdot N_{60prom} MN/m^2$ |
| 6 | Semiempírico | ROM | Por punta | $Q_p = q_p \cdot A_p$ $q_p = \alpha \cdot N_{60prom}$ $\alpha = \left(0.1 + \frac{D_{50}}{D_r}\right) \cdot f_D \leq 0.4$ |
| 7 | Semiempírico | Meyerhof | Por fuste | $Q_f = \sum q_f \cdot A_f$ $q_f = 2 \cdot N_{60}$ $q_f = N_{60}$ |
| 8 | Semiempírico | ROM | Por fuste | $Q_f = \sum q_f \cdot A_f$ $q_f = 2.5 \cdot N_{60}$ |

Variable dependiente

Magnitud de la capacidad de carga del pilote obtenido con las formulaciones del método teórico y método semiempírico, la cual comprende capacidad de carga por fuste y capacidad de carga por punta, su unidad es la tonelada.

3.4 Población y muestra

La muestra pertenece a un pilote que conforma la cimentación del proyecto Desembarcadero Pesquero Artesanal Cerro Azul en Cañete, el pilote es de sección rectangular 0.40mx0.40m, prefabricado de concreto armado y el sistema constructivo es mediante hincado. La población, aunque no es posible definirla con precisión debido a las condiciones particulares de cada proyecto y la heterogeneidad del suelo, se puede considerar a los pilotes de proyectos equiparables a Desembarcaderos Pesqueros Artesanales en la costa marítima del Perú, en estratos de suelos granulares.

3.5 Instrumentos

La medición y recolección de datos es mediante ensayos de mecánica de suelos, los cuales incluyen instrumentos y procedimientos específicos propios de esta disciplina. Asimismo se emplearon datos secundarios para recabar información sobre las teorías de cálculo de capacidad de carga para pilotes. Luego, estos datos se preparan para ser analizados.

3.6 Procedimientos

Se hace una revisión de la teoría existente sobre cálculo de capacidad de carga para pilotes en fuentes como tesis, papers, libros especializados, normas, etc. Teoría de cimentaciones profundas por pilotes, profundizando en métodos de capacidades de carga teóricos y semiempíricos.

Se indaga información del proyecto Desembarcadero Pesquero Artesanal Cerro Azul, cuya cimentación por pilotes es objeto de estudio. Se realiza el reconocimiento de campo y ejecución de ensayos que permitan obtener los parámetros de suelo a emplear en las formulaciones para el cálculo de las capacidades de carga.

Se realizan los cálculos de la capacidad de carga por punta y fuste de pilotes con los parámetros de suelo obtenidos y con las diferentes formulaciones de los métodos teóricos y semiempíricos. Se hace la comparación de resultados y también una comparación cualitativa de los métodos. Finalmente se formulan las conclusiones y recomendaciones.

El procedimiento se puede englobar en tres etapas: primero el estudio de teorías de pilotes y métodos de capacidad de carga, la segunda etapa consiste en la obtención de los parámetros de suelo para el método teórico y método semiempírico, la tercera y última etapa es de evaluación y comparación de resultados de ambos métodos.

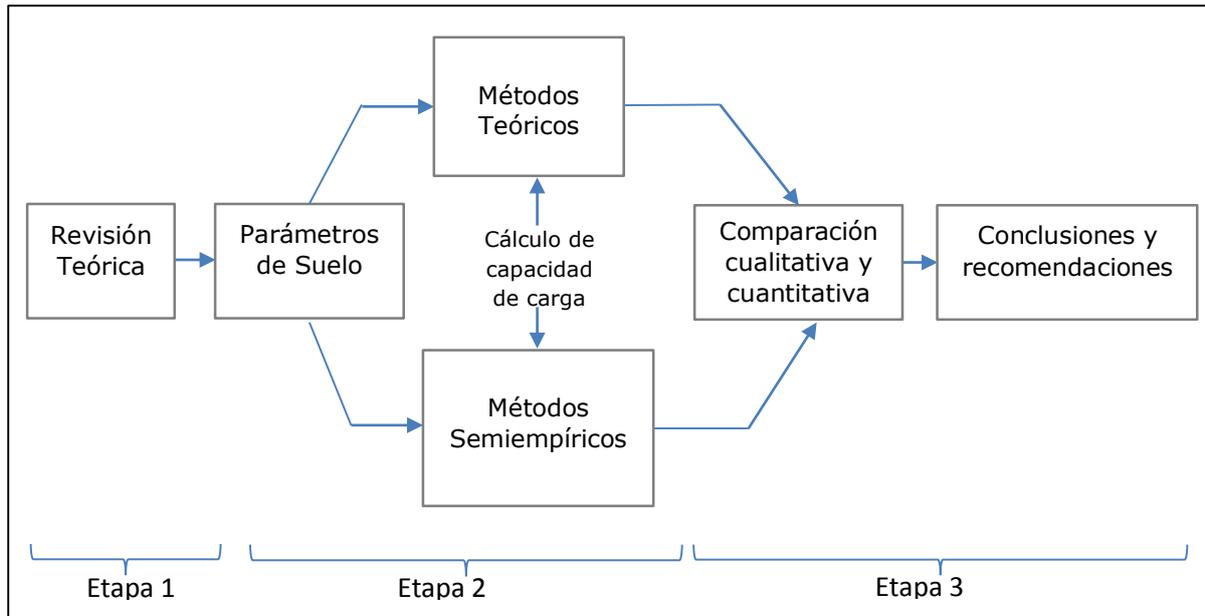


Figura 17: Procedimiento de la investigación

Fuente: Elaboración propia

Primera etapa

Consiste en la revisión teórica sobre cimentación con pilotes y métodos de capacidad de carga. Considerando que la norma E.050 Suelos y cimentaciones del Reglamento Nacional de Edificaciones señala que para el cálculo de capacidad de carga se usa fórmulas aceptadas por la mecánica de suelos, para este trabajo de investigación se considera el método teórico y método semiempírico; dentro de estos las formulaciones propuestas por las Recomendaciones geotécnicas para Obras Marítimas por estar referido a construcciones portuarias y las propuestas por Meyerhof por ser una de las teorías más consolidadas.

Segunda etapa

Consiste en la obtención de parámetros de suelo que servirán de valores de entrada para las formulaciones de cada método. Esta etapa contempla los ensayos de laboratorio y campo necesarios para la aplicación de las formulaciones de la metodología teórica y metodología semiempírica. En el método teórico se requiere conocer el ángulo de fricción y la presión vertical, mientras que el método semiempírico se basa principalmente en el número de penetración estándar N60.

En ambos casos las formulaciones incluyen también coeficientes que dependen de las propiedades del suelo como su granulometría o de características propias del pilote como material, sistema de instalación y disposición geométrica. Cabe resaltar que por tratarse de suelo granulares y saturados por ser un proyecto portuario, obtener muestras inalteradas para los ensayos que lo requieran es complicado, por lo tanto se podría recurrir a correlaciones a partir de ensayos de campo. A continuación se mencionan los ensayos más importantes para obtener los parámetros del suelo.

Análisis Granulométrico

Se realiza para conocer los porcentajes de suelo de los diferentes tamaños por los que está conformado, según la norma MTC E 107. Primero se obtienen muestras representativas de los estratos de suelo donde se va a cimentar, se realiza el lavado por la malla N°200 para separar los suelos finos. El material retenido se diferencia en dos partes, una fracción fina y otra gruesa, limitados por la malla N°4. Se realiza el zarandeo en seco por un juego de tamices registrando los pesos. Finalmente se determina el porcentaje que representa cada rango de tamaños del suelo. De la granulometría se obtiene el valor D50 el cual representa al valor de abertura de la malla por el cual pasa el 50% del suelo.

Ensayo de penetración estándar SPT

El ensayo de penetración estándar es el ensayo geotécnico *in situ* más utilizado, sirve para obtener valores de resistencia del suelo, se realiza según la norma MTC E 119. El procedimiento consiste en la penetración de un muestreador al terreno por medio de golpes, previa limpieza de la superficie. Para ello se dispone de un yunque de 63.5kg que golpea con caída libre de 0.76m. Se registra el número de golpes necesarios para hincar 0.15m; en tres intervalos consecutivos que abarcan 0.45m, los golpes que se consideran en el cálculo del índice N son los del segundo y tercer intervalo.

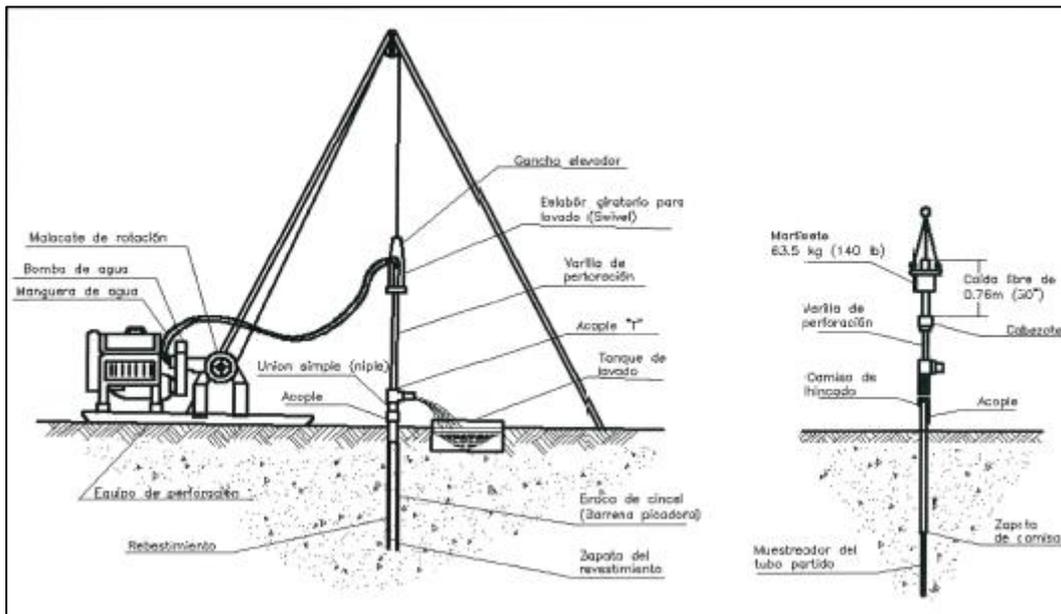


Figura 18: Ensayo de penetración estándar SPT

Fuente: E.050 Suelos y cimentaciones

La caída libre del yunque de 63.5kg implica una energía potencial teórica que en la práctica normalmente equivale a un 60% de esta, además también se debe realizar correcciones debido a la disipación de energía por errores en el procedimiento o propios del equipo de penetración mismo.

$$N_{60}(60\%) = N \cdot \frac{E_r}{60} \cdot \lambda \cdot CN$$

Donde:

N_{60} : Número de penetración estándar corregido

N : Número de golpes del ensayo SPT

E_r : Relación de energía del equipo de penetración

λ : Factor de corrección por longitud de varillaje

CN : Factor de corrección por sobrecarga

Ensayo de corte directo

Este ensayo se desarrolla de acuerdo a la norma MTC E 123, permite calcular la resistencia al corte. Consiste en colocar muestras de suelo en un equipo de corte, se aplica a la muestra fuerza normal y fuerza de corte, la muestra pasa por un proceso de consolidación y luego falla por corte. A partir de las mediciones del proceso se generan gráficos que permiten obtener la cohesión y ángulo de fricción del suelo.

Ensayos para esfuerzo efectivo

El esfuerzo efectivo se obtiene de la diferencia de esfuerzo total y la poro presión, de la multiplicación de la profundidad por el peso específico del suelo sumergido, siendo necesario para este último realizar ensayos para peso específico relativo de partículas sólidas, contenido de humedad, relación de vacíos.

Tercera etapa

Consiste en calcular los resultados de capacidad de carga por métodos teóricos y métodos semiempíricos de pilote para el Desembarcadero Pesquero Artesanal de Cerro Azul. En la estratigrafía se distinguen dos capas, una superior de arena semi compacta hasta 2.25m y una capa inferior de arena con presencia de gravas en estado compacto. Ante un sismo las arenas pierden capacidad portante, siendo preferible alcanzar estratos más resistentes. Por ello en este trabajo, considerando los sistemas de transferencia de carga, en el primer estrato se evalúa la capacidad de carga por fuste y en el segundo estrato la capacidad de carga por punta. Luego se compara los resultados obtenidos y finalmente se redactan las conclusiones y recomendaciones.

3.7 Análisis de datos

Se muestran los valores de los ensayos de suelo, los cuales son los valores de entrada de las formulaciones teóricas y semiempíricas de capacidad de carga de pilotes.

Valor N60 del ensayo de penetración estándar SPT

Mediante el ensayo de penetración estándar SPT y luego de aplicar los factores de corrección correspondientes, obtenemos los valores N60. Los primeros intervalos son los de menor valor, los que van en aumento a mayor profundidad. Se consideran dos estratos, de 0.00m a 2.25m una capa semi compacta y de 2.25m a 6.30m un estrato de mayor densidad. El valor N60 es utilizado en las cuatro formulaciones semiempíricas de este estudio.

Tabla 3: Valores N60 del ensayo SPT

Fuente: Elaboración propia

| REGISTRO | Prof | N60 |
|-----------|------|-----|
| | (m) | 60% |
| 0,15-0,45 | 0.45 | 12 |
| 0,60-0,90 | 0.90 | 19 |
| 1,05-1,35 | 1.35 | 30 |
| 1,50-1,80 | 1.80 | 35 |
| 1,95-2,25 | 2.25 | 33 |
| 2,40-2,70 | 2.70 | 33 |
| 2,85-3,15 | 3.15 | 36 |
| 3,30-3,60 | 3.60 | 36 |
| 3,75-4,05 | 4.05 | 38 |
| 4,20-4,50 | 4.50 | 39 |
| 4,65-4,95 | 4.95 | 39 |
| 5,10-5,40 | 5.40 | 40 |
| 5,55-5,85 | 5.85 | 40 |
| 6,00-6,30 | 6.3 | 40 |

Peso específico

El peso específico multiplicado por la profundidad nos da el esfuerzo efectivo para las cuatro formulaciones teóricas estudiadas. De 0.00m a 2.25m el peso específico es de 16.42 KN/m³ y de 2.25m a 6.30m es de 17.70 KN/m³.

Valor de abertura de la malla por el cual pasa el 50% del suelo D50

El valor D50 se obtiene de la granulometría, se usa en la formulación semiempírica de las Recomendaciones geotécnicas para Obras Marítimas para el cálculo de la capacidad de carga por punta, por ello solo es necesario el valor del segundo estrato. El valor D50 para ese estrato es 0.45mm, el cual se considera como una arena de tamaño medio; las arenas finas son menores a 0.20mm y las gruesas mayores a 0.60mm. El primer y segundo estrato corresponde a una arena pobremente gradada SP.

Ángulo de fricción

Se ha optado por obtener los valores del ángulo de fricción a partir de valores del SPT mediante la fórmula de Peck 1974, Das 1995, Woff 1989: $f = 27,1 + 0,30 N_{60} - 0.00054 N_{60}^2$. Por los resultados obtenidos podemos considerar que la primera capa de 0.00 a 2.25m es un estrato medianamente denso y de 2.25m a 6.30m es un estrato de arena denso.

Tabla 4: Valores de ángulo de fricción

Fuente: Elaboración propia

| REGISTRO | Prof | N60 | Angulo |
|-----------|------|-----|---------------------|
| | (m) | 60% | Friccion (ϕ) |
| 0,15-0,45 | 0.45 | 12 | 31 |
| 0,60-0,90 | 0.90 | 19 | 32 |
| 1,05-1,35 | 1.35 | 30 | 36 |
| 1,50-1,80 | 1.80 | 35 | 37 |
| 1,95-2,25 | 2.25 | 33 | 36 |
| 2,40-2,70 | 2.70 | 33 | 36 |
| 2,85-3,15 | 3.15 | 36 | 37 |
| 3,30-3,60 | 3.60 | 36 | 37 |
| 3,75-4,05 | 4.05 | 38 | 38 |
| 4,20-4,50 | 4.50 | 39 | 38 |
| 4,65-4,95 | 4.95 | 39 | 38 |
| 5,10-5,40 | 5.40 | 40 | 38 |
| 5,55-5,85 | 5.85 | 40 | 38 |
| 6,00-6,30 | 6.3 | 40 | 38 |

IV. RESULTADOS

4.1 Métodos Teóricos

Formulación de Meyerhof para estimar capacidad de carga por punta

La capacidad de carga por punta obtenida crece a mayor profundidad, observándose un cambio de pendiente a 4.95, alcanzando una capacidad de 162t a 6.30m.

Tabla 5: Capacidad de carga por punta Q_p Método Teórico Meyerhof

Fuente: Elaboración propia

| Registro SPT (m) | Prof (m) | q' (KN/m ²) | ϕ (°) | N_q^* | q_l (MN/m ²) | q_p (MN/m ²) | A_p (m ²) | Q_p (t) |
|------------------|----------|---------------------------|------------|---------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------|
| 2,25 | 0.00 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 0.00 |
| 2,40-2,70 | 0.45 | 7.97 | 36 | 176.81 | 6.51 | 1.41 | 0.16 | 22.98 |
| 2,85-3,15 | 0.90 | 15.93 | 37 | 196.85 | 7.45 | 3.14 | 0.16 | 51.16 |
| 3,30-3,60 | 1.35 | 23.90 | 37 | 201.84 | 7.69 | 4.82 | 0.16 | 78.69 |
| 3,75-4,05 | 1.80 | 31.86 | 38 | 218.89 | 8.45 | 6.97 | 0.16 | 108.09 |
| 4,20-4,50 | 2.25 | 39.83 | 38 | 231.03 | 9.03 | 9.03 | 0.16 | 132.52 |
| 4,65-4,95 | 2.70 | 47.79 | 38 | 234.54 | 9.19 | 9.19 | 0.16 | 150.00 |
| 5,10-5,40 | 3.15 | 55.76 | 38 | 236.91 | 9.31 | 9.31 | 0.16 | 154.90 |
| 5,55-5,85 | 3.60 | 63.72 | 38 | 235.13 | 9.22 | 9.22 | 0.16 | 157.99 |
| 6,00-6,30 | 4.05 | 71.69 | 38 | 237.62 | 9.34 | 9.34 | 0.16 | 161.57 |

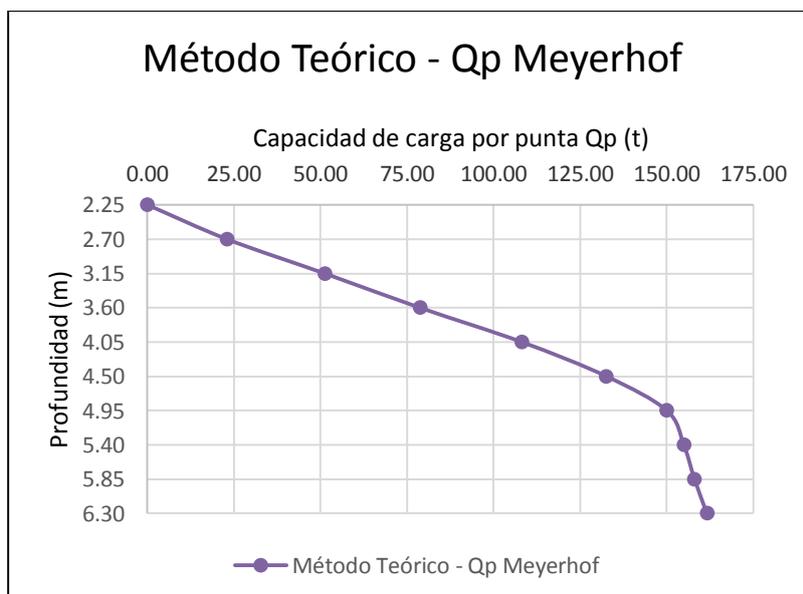


Figura 19: Capacidad de carga por punta Q_p Método Teórico Meyerhof

Fuente: Elaboración propia

Formulación ROM para estimar capacidad de carga por punta

Se aprecia que el incremento de la capacidad de carga de punta con la formulación de las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias, varía de pendiente a una profundidad de 5.85m, luego tiende a ser constante. A la profundidad de 6.30m se tiene una capacidad de carga por punta de 156.10t.

Tabla 6: Capacidad de carga por punta Q_p Método Teórico ROM

Fuente: Elaboración propia

| Registro SPT (m) | Prof (m) | q' (KN/m ²) | ϕ (°) | N_q | f_D | q_p (MN/m ²) | A_p (m ²) | Q_p (t) |
|------------------|----------|---------------------------|------------|-------|-------|----------------------------|-------------------------|-----------|
| 2,25 | 0.00 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 0.00 |
| 2,40-2,70 | 0.45 | 7.97 | 36 | 39.49 | 0.83 | 0.94 | 0.16 | 15.33 |
| 2,85-3,15 | 0.90 | 15.93 | 37 | 43.54 | 0.83 | 2.07 | 0.16 | 33.81 |
| 3,30-3,60 | 1.35 | 23.90 | 37 | 44.64 | 0.83 | 3.19 | 0.16 | 52.00 |
| 3,75-4,05 | 1.80 | 31.86 | 38 | 46.86 | 0.83 | 4.46 | 0.16 | 72.79 |
| 4,20-4,50 | 2.25 | 39.83 | 38 | 48.94 | 0.83 | 5.82 | 0.16 | 95.01 |
| 4,65-4,95 | 2.70 | 47.79 | 38 | 49.56 | 0.83 | 7.08 | 0.16 | 115.46 |
| 5,10-5,40 | 3.15 | 55.76 | 38 | 49.98 | 0.83 | 8.33 | 0.16 | 135.86 |
| 5,55-5,85 | 3.60 | 63.62 | 38 | 49.66 | 0.83 | 9.44 | 0.16 | 154.02 |
| 6,00-6,30 | 4.05 | 63.90 | 38 | 50.11 | 0.83 | 9.57 | 0.16 | 156.10 |

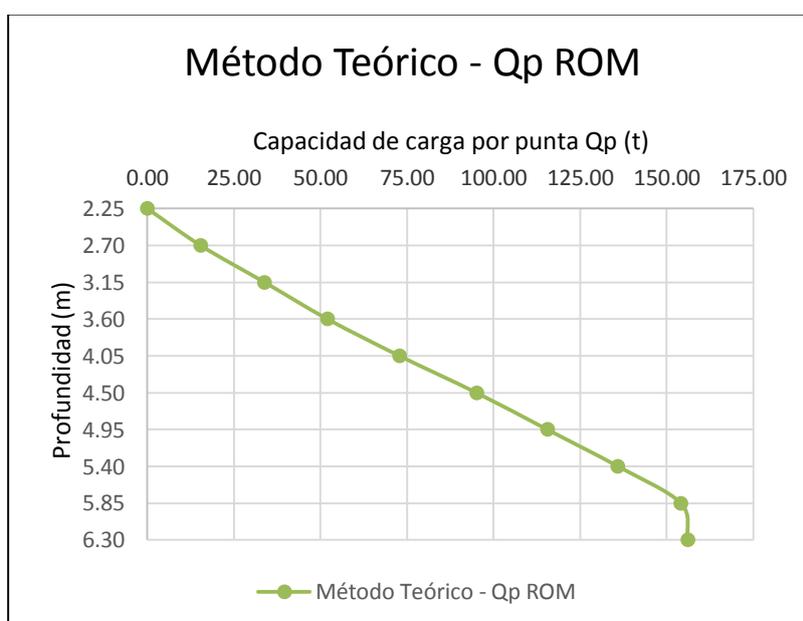


Figura 20: Capacidad de carga por punta Q_p Método Teórico ROM

Fuente: Elaboración propia

Formulación de Meyerhof para estimar capacidad de carga por fuste

La capacidad de carga por fuste obtenida con las formulaciones de Meyerhof crece a mayor profundidad, el análisis abarca hasta la profundidad 2.25m ya que a ese nivel hay una variación de estratos; el estrato más profundo y compacto de 2.25 a 6.30m se considera para la capacidad de carga de punta, mientras que en el estrato más superficial y semi compacto se analiza la capacidad de carga por fuste, alcanzando un valor de 12.74t.

Tabla 7: Capacidad de carga por fuste Qf Método Teórico Meyerhof

Fuente: Elaboración propia

| Registro SPT (m) | Prof (m) | q' (KN/m ²) | φ (°) | K | qf (KN/m ²) | Af (m ²) | Qf (t) | ΣQf (t) |
|------------------|----------|-------------------------|-------|-----|-------------------------|----------------------|--------|---------|
| 0,00 | 0.00 | -- | -- | -- | -- | -- | 0.00 | 0.00 |
| 0,15-0,45 | 0.45 | 7.39 | 31 | 1.5 | 9.93 | 0.72 | 0.73 | 0.73 |
| 0,60-0,90 | 0.9 | 14.78 | 32 | 1.5 | 21.55 | 0.72 | 1.58 | 2.31 |
| 1,05-1,35 | 1.35 | 22.17 | 36 | 1.5 | 35.51 | 0.72 | 2.61 | 4.92 |
| 1,50-1,80 | 1.8 | 29.56 | 37 | 1.5 | 48.34 | 0.72 | 3.55 | 8.47 |
| 1,95-2,25 | 2.25 | 36.95 | 36 | 1.5 | 58.22 | 0.72 | 4.27 | 12.74 |

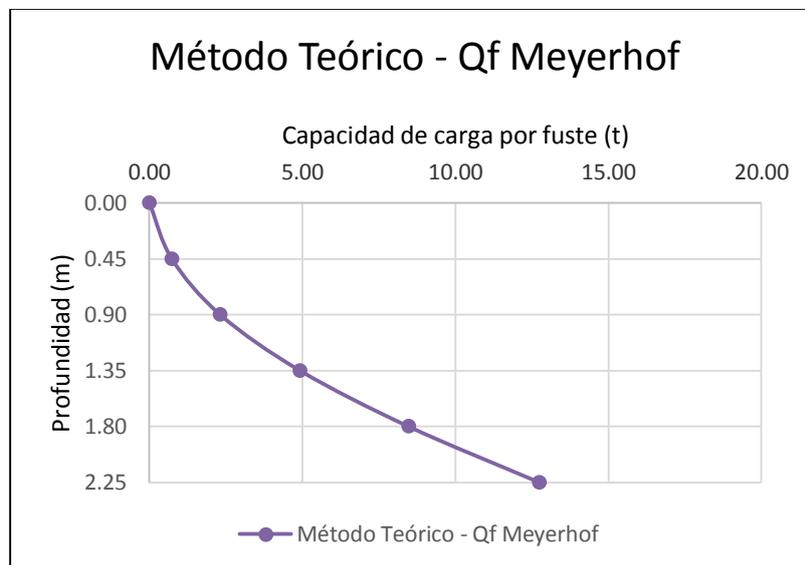


Figura 21: Capacidad de carga por fuste Qf Método Teórico Meyerhof

Fuente: Elaboración propia

Formulación ROM para estimar capacidad de carga por fuste

La capacidad de carga por fuste con la formulación de las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias aumenta a mayor profundidad de manera no lineal, describiendo una línea curva. Esta formulación considera el proceso constructivo del pilote y su material, se limita la resistencia unitaria por fuste a 125KN/m² para pilotes hincados y a 90KN/m² para pilotes excavados. En la evaluación realizada, la capacidad de carga por fuste a una profundidad de 2.25m es de 11.53t.

Tabla 8: Capacidad de carga por fuste Qf Método Teórico ROM

Fuente: Elaboración propia

| Registro SPT (m) | Prof (m) | q' (KN/m ²) | φ (°) | K | qf (KN/m ²) | Af (m ²) | Qf (t) | ΣQf (t) |
|------------------|----------|-------------------------|-------|------|-------------------------|----------------------|--------|---------|
| 0,00 | 0.00 | -- | -- | -- | -- | -- | 0.00 | 0.00 |
| 0,15-0,45 | 0.45 | 7.39 | 31 | 0.75 | 8.53 | 0.72 | 0.63 | 0.63 |
| 0,60-0,90 | 0.9 | 14.78 | 32 | 0.75 | 18.96 | 0.72 | 1.39 | 2.02 |
| 1,05-1,35 | 1.35 | 22.17 | 36 | 0.75 | 32.36 | 0.72 | 2.38 | 4.39 |
| 1,50-1,80 | 1.8 | 29.56 | 37 | 0.75 | 44.44 | 0.72 | 3.26 | 7.66 |
| 1,95-2,25 | 2.25 | 36.95 | 36 | 0.75 | 52.71 | 0.72 | 3.87 | 11.53 |

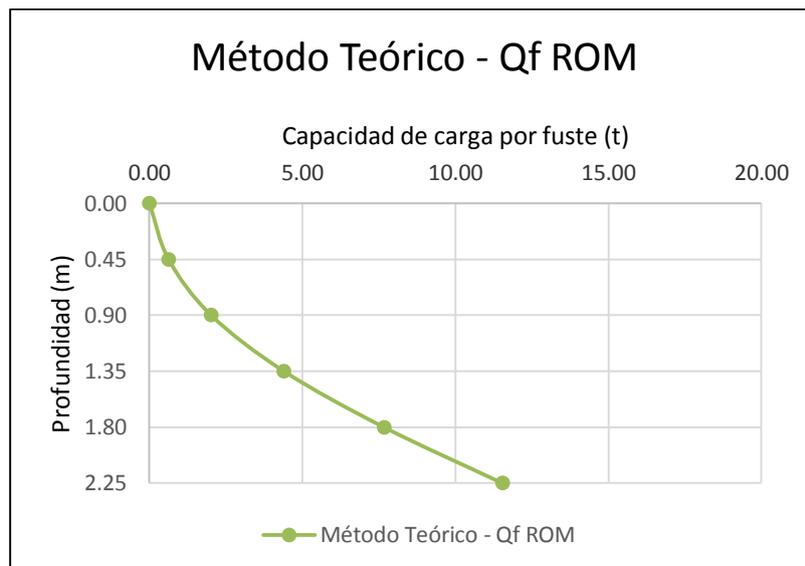


Figura 22: Capacidad de carga por fuste Qf Método Teórico ROM

Fuente: Elaboración propia

4.2 Métodos Semiempíricos

Formulación de Meyerhof para estimar capacidad de carga por punta

En la formulación resistencia unitaria por punta tiene un valor límite, sin embargo en este análisis hasta una profundidad de 6.30m no se llega a ese límite, alcanzando un valor de capacidad de carga por punta de 204.75t.

Tabla 9: Capacidad de carga por punta Qp Método Semiempírico Meyerhof

Fuente: Elaboración propia

| Registro SPT (m) | Prof (m) | N60 | N60prom | L (m) | D (m) | qp (MN/m2) | Ap (m2) | Qp (t) |
|------------------|----------|-----|---------|-------|-------|------------|---------|--------|
| 2,25 | 0.00 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 0.00 |
| 2,40-2,70 | 0.45 | 33 | 33.10 | 0.45 | 0.51 | 1.17 | 0.16 | 19.06 |
| 2,85-3,15 | 0.90 | 36 | 34.17 | 0.90 | 0.51 | 2.41 | 0.16 | 39.35 |
| 3,30-3,60 | 1.35 | 36 | 35.28 | 1.35 | 0.51 | 3.74 | 0.16 | 60.95 |
| 3,75-4,05 | 1.80 | 38 | 36.43 | 1.80 | 0.51 | 5.14 | 0.16 | 83.90 |
| 4,20-4,50 | 2.25 | 39 | 37.55 | 2.25 | 0.51 | 6.63 | 0.16 | 108.11 |
| 4,65-4,95 | 2.70 | 39 | 38.42 | 2.70 | 0.51 | 8.14 | 0.16 | 132.76 |
| 5,10-5,40 | 3.15 | 40 | 38.82 | 3.15 | 0.51 | 9.59 | 0.16 | 156.48 |
| 5,55-5,85 | 3.60 | 40 | 39.23 | 3.60 | 0.51 | 11.08 | 0.16 | 180.70 |
| 6,00-6,30 | 4.05 | 40 | 39.51 | 4.05 | 0.51 | 12.55 | 0.16 | 204.75 |

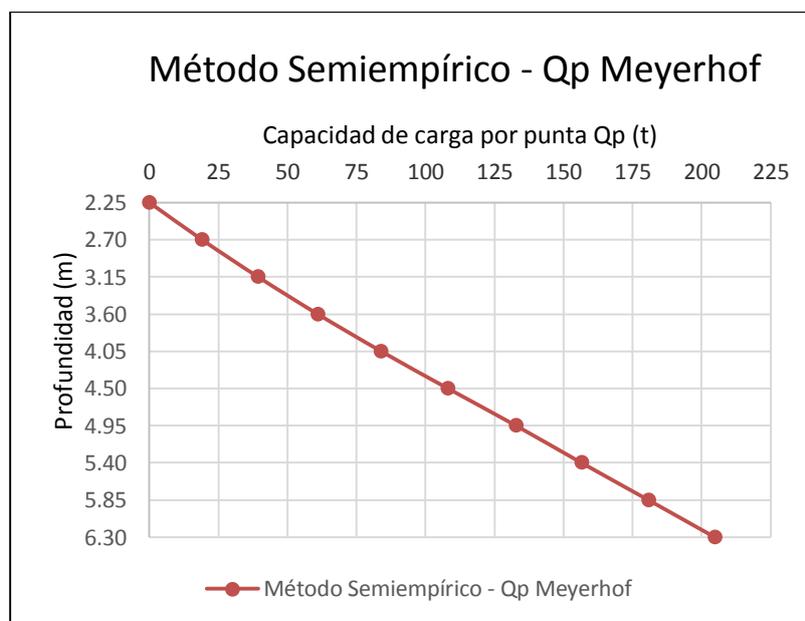


Figura 23: Capacidad de carga por punta Qp Método Semiempírico Meyerhof

Fuente: Elaboración propia

Formulación ROM para estimar capacidad de carga por punta

Se aprecia que el incremento de la capacidad de carga de punta con la formulación de las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias, varía de pendiente a una profundidad de 4.50m, luego tiende a ser constante. A la profundidad de 6.30m se tiene una capacidad de carga por punta de 173.38t.

Tabla 10: Capacidad de carga por punta Q_p Método Semiempírico ROM

Fuente: Elaboración propia

| Registro SPT (m) | Prof (m) | α | N60prom | D50 (mm) | f_D | qp (MN/m ²) | Ap (m ²) | Qp (t) |
|------------------|----------|----------|---------|----------|-------|-------------------------|----------------------|--------|
| 2,25 | 0.00 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 0.00 |
| 2,40-2,70 | 0.45 | 0.27 | 11.59 | 0.45 | 0.83 | 3.13 | 0.16 | 51.00 |
| 2,85-3,15 | 0.90 | 0.27 | 19.76 | 0.45 | 0.83 | 5.33 | 0.16 | 86.97 |
| 3,30-3,60 | 1.35 | 0.27 | 26.26 | 0.45 | 0.83 | 7.08 | 0.16 | 115.59 |
| 3,75-4,05 | 1.80 | 0.27 | 32.61 | 0.45 | 0.83 | 8.80 | 0.16 | 143.52 |
| 4,20-4,50 | 2.25 | 0.27 | 37.55 | 0.45 | 0.83 | 10.13 | 0.16 | 165.26 |
| 4,65-4,95 | 2.70 | 0.27 | 38.42 | 0.45 | 0.83 | 10.36 | 0.16 | 169.11 |
| 5,10-5,40 | 3.15 | 0.27 | 38.82 | 0.45 | 0.83 | 10.47 | 0.16 | 170.85 |
| 5,55-5,85 | 3.60 | 0.27 | 39.23 | 0.45 | 0.83 | 10.58 | 0.16 | 172.64 |
| 6,00-6,30 | 4.05 | 0.27 | 39.51 | 0.45 | 0.83 | 10.66 | 0.16 | 173.88 |

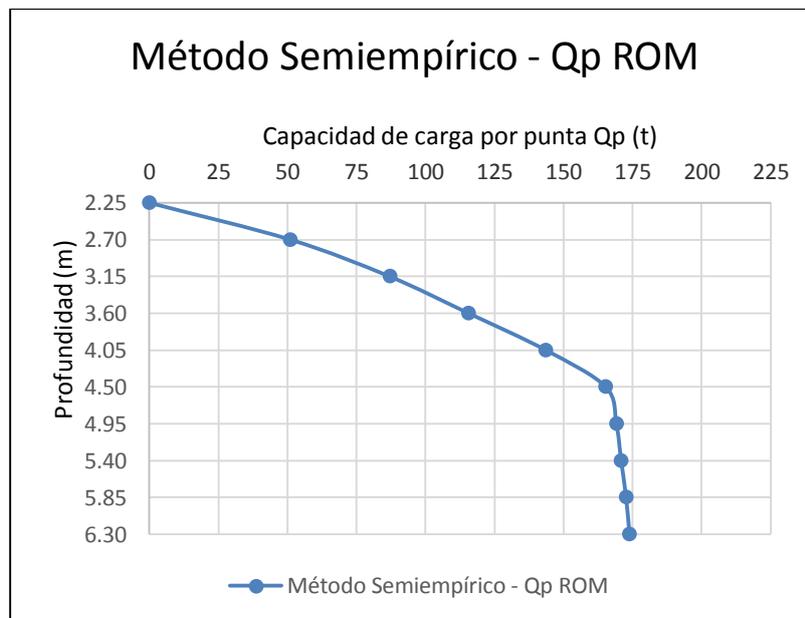


Figura 24: Capacidad de carga por punta Q_p Método Semiempírico ROM

Fuente: Elaboración propia

Formulación de Meyerhof para estimar capacidad de carga por fuste

Para el cálculo de la capacidad de carga por fuste, la formulación considerada es la pilotes hincados de alto desplazamiento debido al procedimiento constructivo y la configuración del pilote, el cual es concreto prefabricado de sección cuadrada y punta cerrada. A la profundidad de 2.25m el valor de capacidad de carga por fuste es 14.16t.

Tabla 11: Capacidad de carga por fuste Qf Método Semiempírico Meyerhof

Fuente: Elaboración propia

| Registro SPT (m) | Prof (m) | q' (KN/m2) | ϕ (°) | N60 | qf | Af | Qf | ΣQf |
|------------------|----------|------------|------------|-----|---------|------|------|-------------|
| | | | | | (KN/m2) | (m2) | (t) | (t) |
| 0,00 | 0.00 | -- | -- | -- | -- | -- | 0.00 | 0.00 |
| 0,15-0,45 | 0.45 | 7.39 | 31 | 12 | 18.32 | 0.72 | 1.35 | 1.35 |
| 0,60-0,90 | 0.9 | 14.78 | 32 | 19 | 27.76 | 0.72 | 2.04 | 3.38 |
| 1,05-1,35 | 1.35 | 22.17 | 36 | 30 | 44.58 | 0.72 | 3.27 | 6.66 |
| 1,50-1,80 | 1.8 | 29.56 | 37 | 35 | 53.00 | 0.72 | 3.89 | 10.55 |
| 1,95-2,25 | 2.25 | 36.95 | 36 | 33 | 49.16 | 0.72 | 3.61 | 14.16 |

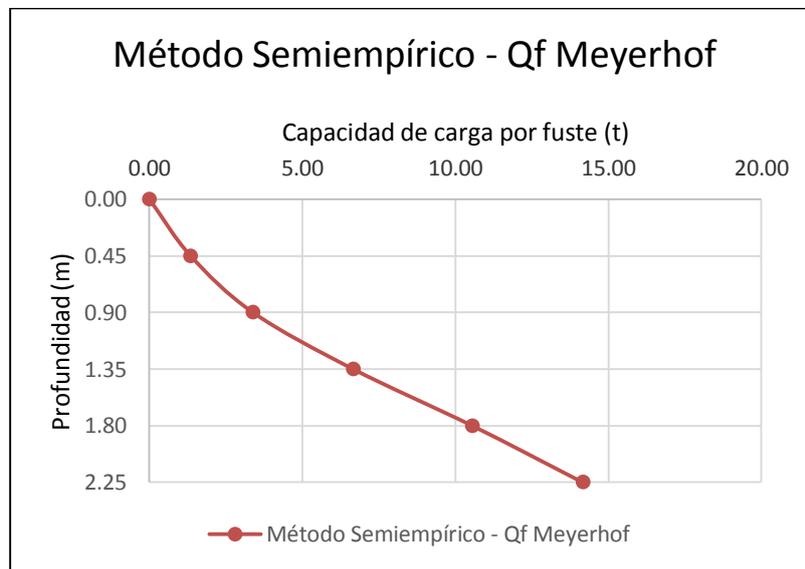


Figura 25: Capacidad de carga por fuste Qf Método Semiempírico Meyerhof

Fuente: Elaboración propia

Formulación ROM para estimar capacidad de carga por fuste

La capacidad de carga por fuste con la formulación para pilotes hincados en suelos granulares de las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias aumenta a mayor profundidad de manera no lineal, describiendo una línea curva. La formulación es similar a la propuesta de Meyerhof aunque con un mayor coeficiente. En la evaluación realizada, la capacidad de carga por fuste a una profundidad de 2.25m es de 17.70t.

Tabla 12: Capacidad de carga por fuste Qf Método Semiempírico ROM

Fuente: Elaboración propia

| Registro SPT (m) | Prof (m) | q' (KN/m ²) | φ (°) | N60 | qf (KN/m ²) | Af (m ²) | Qf (t) | ΣQf (t) |
|------------------|----------|-------------------------|-------|-----|-------------------------|----------------------|--------|---------|
| 0,00 | 0.00 | -- | -- | -- | -- | -- | 0.00 | 0.00 |
| 0,15-0,45 | 0.45 | 7.39 | 31 | 12 | 22.90 | 0.72 | 1.68 | 1.68 |
| 0,60-0,90 | 0.9 | 14.78 | 32 | 19 | 34.70 | 0.72 | 2.55 | 4.23 |
| 1,05-1,35 | 1.35 | 22.17 | 36 | 30 | 55.73 | 0.72 | 4.09 | 8.32 |
| 1,50-1,80 | 1.8 | 29.56 | 37 | 35 | 66.26 | 0.72 | 4.86 | 13.19 |
| 1,95-2,25 | 2.25 | 36.95 | 36 | 33 | 61.46 | 0.72 | 4.51 | 17.70 |

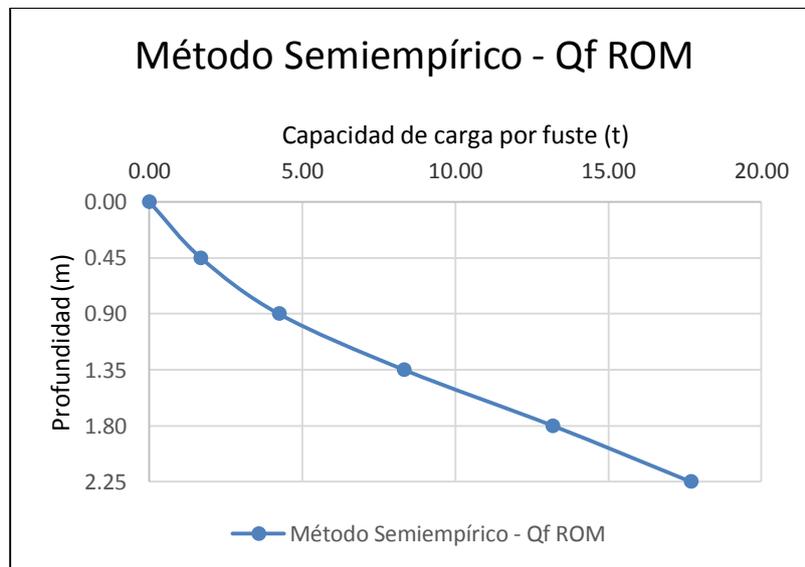


Figura 26: Capacidad de carga por fuste Qf Método Semiempírico ROM

Fuente: Elaboración propia

Resumen de resultados

Tabla 13: Valores de capacidad de carga por fuste Qf expresado en toneladas

Fuente: Elaboración propia

| Profundidad (m) | 0.00 | 0.45 | 0.90 | 1.35 | 1.80 | 2.25 |
|-----------------------------------|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Método Semiempírico - Qf ROM | -- | 1.68155 | 4.22948 | 8.32089 | 13.1854 | 17.6974 |
| Método Semiempírico - Qf Meyerhof | -- | 1.34524 | 3.38358 | 6.65671 | 10.5483 | 14.158 |
| Método Teórico - Qf Meyerhof | -- | 0.72931 | 2.31118 | 4.91806 | 8.46702 | 12.7416 |
| Método Teórico - Qf ROM | -- | 0.62609 | 2.01826 | 4.3941 | 7.65706 | 11.5272 |

Tabla 14: Valores de capacidad de carga por punta Qp expresado en toneladas

Fuente: Elaboración propia

| Profundidad (m) | 2.25 | 2.70 | 3.15 | 3.60 | 4.05 | 4.50 | 4.95 | 5.40 | 5.85 | 6.30 |
|-----------------------------------|------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Método Semiempírico - Qp Meyerhof | -- | 19.06 | 39.35 | 60.95 | 83.90 | 108.11 | 132.76 | 156.48 | 180.70 | 204.75 |
| Método Semiempírico - Qp ROM | -- | 51.00 | 86.97 | 115.59 | 143.52 | 165.26 | 169.11 | 170.85 | 172.64 | 173.88 |
| Método Teórico - Qp Meyerhof | -- | 22.98 | 51.16 | 78.69 | 108.09 | 132.52 | 150.00 | 154.90 | 157.99 | 161.57 |
| Método Teórico - Qp ROM | -- | 15.33 | 33.81 | 52.00 | 72.79 | 95.01 | 115.46 | 135.86 | 154.02 | 156.10 |

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se presenta la discusión de resultados de la capacidad de carga por fuste a la profundidad de 0.00m a 2.25m que abarca el estrato superficial de arena semi compacta, seguido de la discusión de resultados de la capacidad de carga por punta a la profundidad de 2.25m a 6.30m correspondiente al estrato de arena con grava en estado compacto.

Capacidad de carga por fuste

Las formulaciones con las que se obtienen un mayor valor de capacidad de carga por fuste son las de metodología semiempírico, la más alta corresponde a la formulación de las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias, que es basada en la formulación de Meyerhof pero usa un coeficiente mayor. Con las otras dos formulaciones del método teórico se obtienen valores más conservadores.

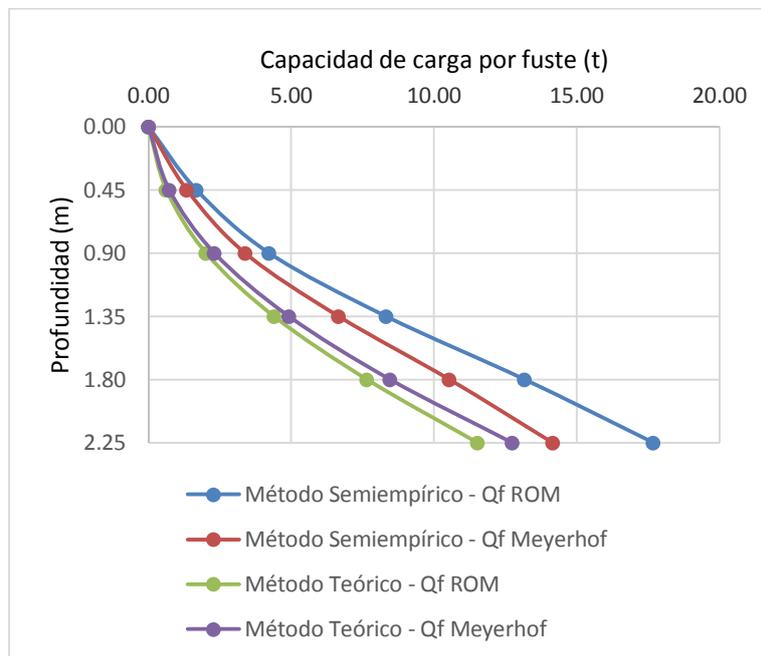


Figura 27: Capacidad de carga por fuste Q_f por diferentes formulaciones

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15: Valores de capacidad de carga por fuste Q_f expresado en porcentaje

Fuente: Elaboración propia

| Profundidad (m) | 0.00 | 0.45 | 0.90 | 1.35 | 1.80 | 2.25 |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Método Semiempírico - Q_f ROM | -- | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Método Semiempírico - Q_f Meyerhof | -- | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% |
| Método Teórico - Q_f Meyerhof | -- | 43% | 55% | 59% | 64% | 72% |
| Método Teórico - Q_f ROM | -- | 37% | 48% | 53% | 58% | 65% |

A la profundidad de 2.25m, considerando como 100% al valor de la capacidad de carga por fuste a la obtenida con la formulación semiempírica de las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias por ser el mayor, se observa que las variaciones con las otras tres formulaciones son de 20%, 28% y 35%.

Capacidad de carga por punta

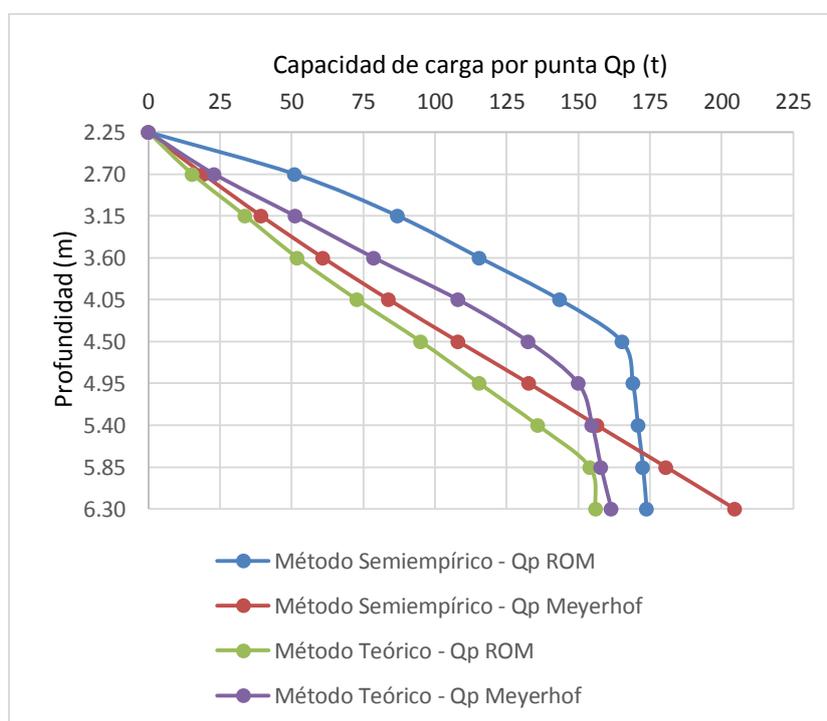


Figura 28: Capacidad de carga por punta Q_p por diferentes formulaciones

Fuente: Elaboración propia

En el método teórico el incremento de las capacidades de carga por punta están limitadas por un concepto de longitud crítica de empotramiento o en el caso del método semiempírico, por un valor máximo N60 del ensayo de penetración estándar SPT, lo cual se nota en la gráfica con un cambio de pendiente de la curva, excepto por la formulación semiempírica de Meyerhof cuyo límite se da a mayor profundidad. Se observa que el método semiempírico es el que tiene mayores valores en comparación con el método teórico.

Tabla 16: Valores de capacidad de carga por punta Qp expresado en porcentaje

Fuente: Elaboración propia

| Profundidad (m) | 2.25 | 2.70 | 3.15 | 3.60 | 4.05 | 4.50 | 4.95 | 5.40 | 5.85 | 6.30 |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Método Semiempírico - Qp Meyerhof | -- | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Método Semiempírico - Qp ROM | -- | 268% | 221% | 190% | 171% | 153% | 127% | 109% | 96% | 85% |
| Método Teórico - Qp Meyerhof | -- | 121% | 130% | 129% | 129% | 123% | 113% | 99% | 87% | 79% |
| Método Teórico - Qp ROM | -- | 80% | 86% | 85% | 87% | 88% | 87% | 87% | 85% | 76% |

A la profundidad de 6.30m, considerando como 100% al valor de la capacidad de carga por punta a la obtenida con la formulación semiempírica propuesta por Meyerhof por ser el mayor, se observa que las variaciones con las otras tres formulaciones son de 15%, 21% y 24%.

En ambos casos, tanto en la capacidad de carga por punta y capacidad de carga por fuste, con el método semiempírico se obtiene mayores valores y con el método teórico, valores más conservadores. La variación mayor a la profundidad de 2.25m para la capacidad de carga por fuste es de 35%, y a la profundidad de 6.30m para la capacidad de carga por punta es de 24%. Estos valores de variación muestran cierta tendencia que permite validar los cálculos obtenidos. En caso de una variación considerable de alguno de valores se descarta, de lo contrario se promedian los valores de capacidad de carga obtenidos por las diferentes formulaciones. El valor promedio de la capacidad de carga por fuste es de 14.03t y el valor promedio de capacidad de carga por punta es de 174.07t.

El método teórico tiene como datos de entrada a sus formulaciones el ángulo de fricción y la presión efectiva del terreno, además de otros factores de capacidad de carga. El método semiempírico se basa principalmente en el valor del número de penetración estándar N60 del ensayo SPT. Los datos de entrada del método teórico y método semiempírico se correlacionan, esto permite que el empleo de formulaciones de ambos métodos se corrobore entre sí. Adicionalmente cada formulación tiene factores que dependen de las condiciones particulares para cada pilote como el método de instalación, material del pilote y tipo de suelo, en el caso de esta investigación para pilotes hincados de concreto en suelo granular para un desembarcadero pesquero artesanal.

Los resultados obtenidos coinciden con lo que encontró Pizarro y Romero (2017) en el sentido de que con los métodos teóricos se obtienen valores menores de capacidad de carga, sin embargo su estudio analiza pilotes para cimentaciones de puentes en suelos cohesivos y arenosos. Por otro lado, Barreto (2011) señala que los métodos de diseño subestiman la capacidad de carga real de los pilotes, por lo tanto, aunque en este trabajo los valores obtenidos por métodos semiempíricos son mayores a los del método teórico, ambos métodos se podrían considerar como conservadores. Los valores obtenidos se podrán ajustar mejor a la realidad con el uso de factores de seguridad adecuados, para lo que es importante también la experiencia y criterio del ingeniero responsable.

VI. CONCLUSIONES

- Se realizó la evaluación de la capacidad de carga de pilote para el desembarcadero pesquero artesanal Cerro Azul, teniendo en consideración las características propias del proyecto: El pilote es prefabricado de concreto armado, de sección cuadrada 0.40x0.40m, método de instalación por hincado en suelo granular. La estratigrafía del suelo presenta un primer estrato semi compacto de 2.25m de espesor donde se analiza la capacidad por fuste, seguida de un estrato inferior compacto donde se evalúa la capacidad de punta. Se emplea métodos teóricos y semiempíricos de la norma española Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias (ROM) y del autor Meyerhof.
- Los valores de capacidad de carga por fuste a la profundidad de 2.25m obtenidos son:

Tabla 17: Valores de capacidad de carga por fuste Q_f a 2.25m de profundidad

Fuente: Elaboración propia

| Método/Fuente | $Q_f(t)$ | $Q_f(\%)$ |
|--------------------------------------|----------|-----------|
| Método Semiempírico - Q_f ROM | 17.6974 | 100% |
| Método Semiempírico - Q_f Meyerhof | 14.158 | 80% |
| Método Teórico - Q_f Meyerhof | 12.7416 | 72% |
| Método Teórico - Q_f ROM | 11.5272 | 65% |

Con respecto al valor obtenido con la formulación semiempírica de las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias, se observa que las variaciones con las formulación semiempírica de Meyerhof, la formulación teórica de Meyerhof y la formulación teórica ROM son de 20%, 28% y 35% respectivamente.

- Los valores de capacidad de carga por punta a la profundidad de 6.30m obtenidos son:

Tabla 18: Valores de capacidad de carga por punta Q_p a 6.30m de profundidad

Fuente: Elaboración propia

| Método/Fuente | $Q_p(t)$ | $Q_p(\%)$ |
|--------------------------------------|----------|-----------|
| Método Semiempírico - Q_p Meyerhof | 204.749 | 100% |
| Método Semiempírico - Q_p ROM | 173.875 | 85% |
| Método Teórico - Q_p Meyerhof | 161.566 | 79% |
| Método Teórico - Q_p ROM | 156.101 | 76% |

Con respecto al valor obtenido con la formulación semiempírica propuesta por Meyerhof, se observa que las variaciones con la formulación semiempírica ROM, la formulación teórica de Meyerhof y formulación teórica ROM son de 15%, 21% y 24%.

- En ambos casos, tanto en la capacidad de carga por punta y capacidad de carga por fuste, con el método semiempírico se obtiene mayores valores y con el método teórico, valores más conservadores. Los porcentajes de variación muestran cierta tendencia que permite validar los cálculos obtenidos, por lo tanto se promedian los valores de capacidad de carga de las diferentes formulaciones para hallar el valor a considerarse en el diseño, obteniéndose como resultado 14.03t para la capacidad de carga por fuste y 174.07t para la capacidad de carga por punta.
- Evaluar la capacidad de carga de pilotes con métodos teóricos y semiempíricos permite obtener valores más confiables para el diseño de cimentaciones profundas en infraestructuras portuarias.

VII. RECOMENDACIONES

- Se sugiere afectar las formulaciones por los factores de reducción correspondientes según el material del pilote, el sistema de instalación propuesto, la estratigrafía del terreno, la configuración geométrica del pilote para ajustarse a las condiciones particulares de cada proyecto.
- Se recomienda estimar la forma de trabajo del pilote según las particularidades del proyecto y la estratigrafía del terreno, ya que de acuerdo a los mecanismos de transferencia los pilotes pueden trabajar por punta, por fuste o en un estado intermedio.
- Se recomienda el uso de al menos una formulación de método teórico y otra del método semiempírico ya que sus valores de entrada son diferentes pero están correlacionados entre sí, esto permite corroborar los cálculos de capacidades de carga. También son factores influyentes, el criterio ingenieril y la experiencia del profesional en temas de cimentaciones profundas.
- Se recomienda realizar más trabajos de investigación sobre cimentación profunda por pilotes con datos propios de nuestro país, ya que muchas fórmulas tienen una concepción empírica que necesitan ajustarse o ser corroboradas.

VIII. REFERENCIAS

- Alva, J. (2011). *Cimentaciones profundas*. Lima, Perú: Guzlop.
- Barrantes, L. (2017). *Tecnología para cimentaciones por pilotaje en proyectos de Ingeniería Civil* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Federico Villarreal, Perú.
- Barreto, A. (2011). *Evaluación comparativa de la capacidad de carga en cimentaciones profundas. Fórmulas analíticas y ensayos de carga* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Camargo, D. (2016). *Análisis de distintos procedimientos para el cálculo de la carga de hundimiento de pilotes* (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Das, B. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. México: Cengage Learning.
- Eyzaguirre, C. (2014). *Diseño y construcción de un muelle para embarque de minerales* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.
- Fuentes, C. (2001). *Ingeniería Portuaria*. Lima, Perú: Coper.
- León, G. (2017). *Estudio comparativo de las metodologías de Poulos, Meyerhof y CCPI4 de cálculo de carga última para pilotes pre excavados en suelos granulares y comparación de los resultados con cinco pruebas de carga* (Tesis de grado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.
- Ministerio de Fomento (2005). *Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias ROM 0.5-05*. Madrid, España: El Ministerio.

- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018). *E.050 Suelos y Cimentaciones*. Lima, Perú: El Ministerio.
- Ninanya, K. (2018). *Evaluación de la capacidad de carga de pilotes excavados en arcillas a través de métodos estáticos y pruebas de carga* (Tesis de pregrado). Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.
- Pizarro, J. y Romero, J. (2017). *Análisis comparativo de asentamientos y capacidades de carga evaluados y esperados en pilotes perforados en los puentes Fortaleza y Crisnejas* (Tesis de grado). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú.
- Polo, B. (2013). *Dimensionamiento de cimentaciones profundas mediante pilotes. Aplicación a la autovía noroeste de Murcia* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Quinga, K. (2017). *Metodología para el cálculo de la capacidad de carga en pilotes, basado en la Norma Ecuatoriana de la Construcción* (Tesis de pregrado). Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador.
- Rodríguez, M. & Torpoco, F. (2015). *Manual de construcción e instalación de pilotes según la práctica de empresas especializadas en el Perú* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú.

IX. ANEXOS

- Panel fotográfico
- Plano del proyecto Desembarcadero pesquero artesanal en Cerro Azul, Cañete
- Formatos de cálculo de capacidad de carga

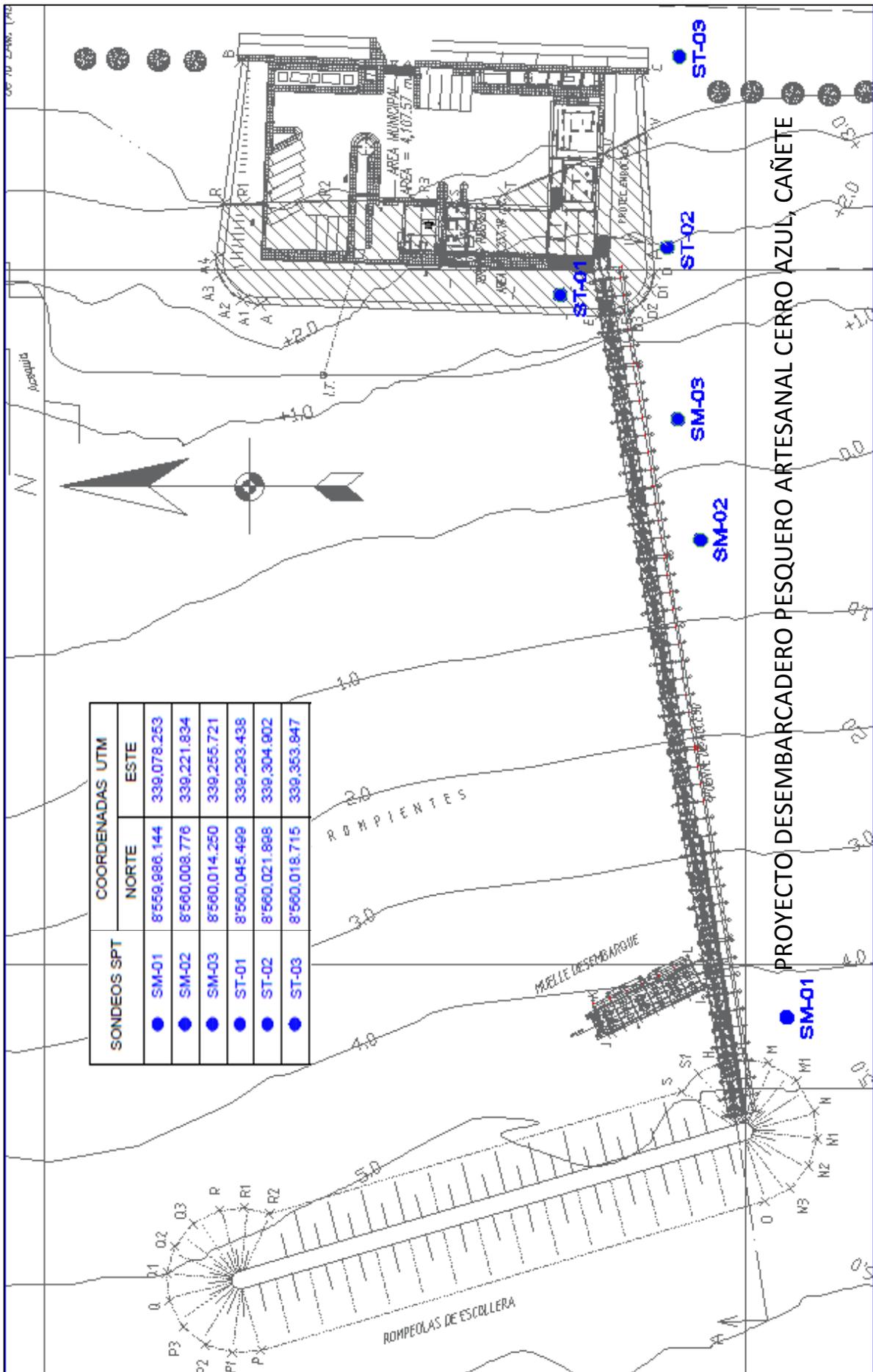
Panel Fotográfico



Foto 01. Ensayo de penetración estándar (SPT)



Foto 02. Ubicación del proyecto en el distrito de Cerro Azul, Cañete



CALCULO DE CAPACIDAD DE CARGA POR PUNTA - MÉTODO TEÓRICO

Propuesta por Meyerhof

Tesis : Evaluación de capacidad de carga de pilotes mediante métodos teóricos y semiempíricos para el Desembarcadero Pesquero Artesanal de Cerro Azul, Cañete

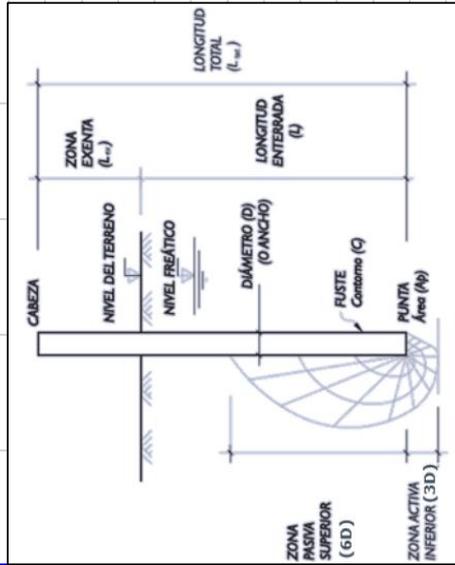
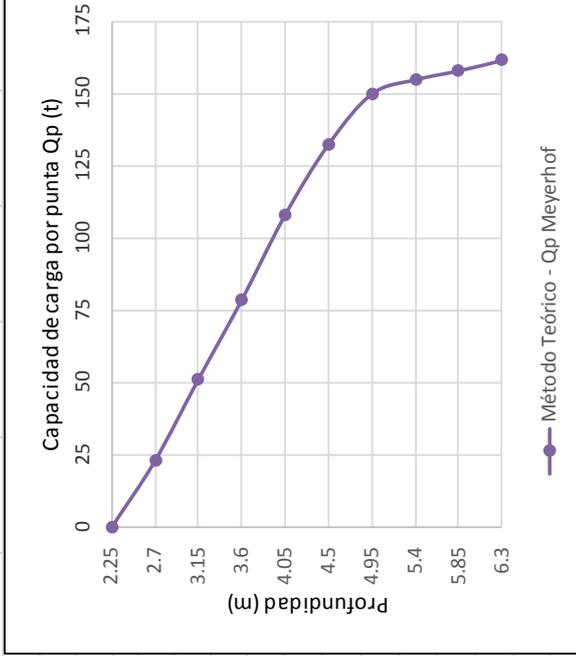
Autora : Bach. Lourdes Milagros Gavidia Pinedo

| Datos del Pilote | | Datos del estudio de campo | |
|------------------------------|------------|----------------------------|---------------|
| Tipo de sección | : Cuadrada | Fecha | : 08/02/2018 |
| Lado (m) | : 0.4 | Distrito | : Cerro Azul |
| Área punta (m ²) | : 0.16 | Provincia | : Cañete |
| Perímetro (m) | : 1.6 | Región | : Lima |
| Diámetro eq. (m) | : 0.51 | Coordenadas UTM | |
| Instalación | : Hincado | Norte | : 8559986.144 |
| Material | : Concreto | Este | : 339078.253 |
| Tipo de suelo | : Granular | | |

Formulaciones:

$$Q_p = q_p \cdot A_p = A_p \cdot q' \cdot N_q^* \leq A_p \cdot q_t$$

$$q_t = 0.05 \cdot N_q^* \cdot \tan \phi$$



| Registro | Prof (m) | q' (KN/m ²) | φ (°) | N _q [*] | q _l (MN/m ²) | q _p (MN/m ²) | A _p (m ²) | Q _p (t) |
|-----------|----------|-------------------------|-------|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 2,25 | 0.00 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 0.00 |
| 2,40-2,70 | 0.45 | 7.97 | 36 | 176.81 | 6.51 | 1.41 | 0.16 | 22.98 |
| 2,85-3,15 | 0.90 | 15.93 | 37 | 196.85 | 7.45 | 3.14 | 0.16 | 51.16 |
| 3,30-3,60 | 1.35 | 23.90 | 37 | 201.84 | 7.69 | 4.82 | 0.16 | 78.69 |
| 3,75-4,05 | 1.80 | 31.86 | 38 | 218.89 | 8.45 | 6.97 | 0.16 | 108.09 |
| 4,20-4,50 | 2.25 | 39.83 | 38 | 231.03 | 9.03 | 9.03 | 0.16 | 132.52 |
| 4,65-4,95 | 2.70 | 47.79 | 38 | 234.54 | 9.19 | 9.19 | 0.16 | 150.00 |
| 5,10-5,40 | 3.15 | 55.76 | 38 | 236.91 | 9.31 | 9.31 | 0.16 | 154.90 |
| 5,55-5,85 | 3.60 | 63.72 | 38 | 235.13 | 9.22 | 9.22 | 0.16 | 157.99 |
| 6,00-6,30 | 4.05 | 71.69 | 38 | 237.62 | 9.34 | 9.34 | 0.16 | 161.57 |

CALCULO DE CAPACIDAD DE CARGA POR PUNTA - MÉTODO TEÓRICO

ROM Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias

Tesis : Evaluación de capacidad de carga de pilotes mediante métodos teóricos y semiempíricos para el Desembarcadero Pesquero Artesanal de Cerro Azul, Cañete

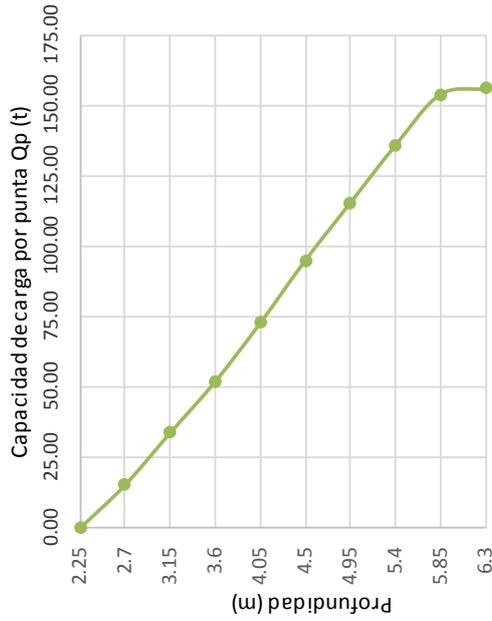
Autora : Bach. Lourdes Milagros Gavidia Pinedo

| Datos del Pilote | | Datos del estudio de campo | |
|------------------------------|------------|----------------------------|---------------|
| Tipo de sección | : Cuadrada | Fecha | : 08/02/2018 |
| Lado (m) | : 0.4 | Distrito | : Cerro Azul |
| Área punta (m ²) | : 0.16 | Provincia | : Cañete |
| Perímetro (m) | : 1.6 | Región | : Lima |
| Diámetro eq. (m) | : 0.51 | Coordenadas UTM | |
| Instalación | : Hincado | Norte | : 8559986.144 |
| Material | : Concreto | Este | : 339078.253 |
| Tipo de suelo | : Granular | | |

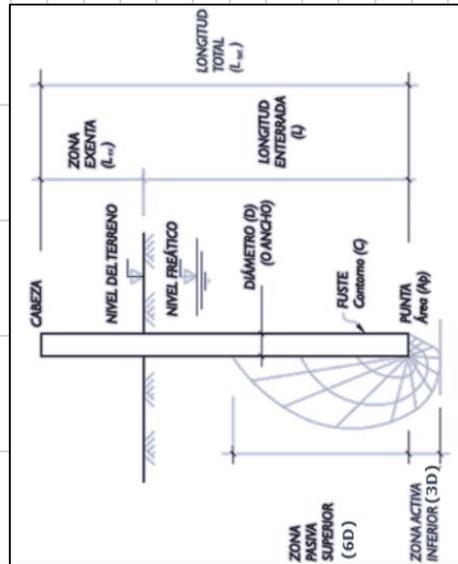
Formulaciones:

$$Q_p = q_p \cdot A_p$$

$$q_p = 3 \cdot q' \cdot N_q \cdot f_D \leq 20 \text{ MN/m}^2$$



—●— Método Teórico - Qp ROM



| Registro | Prof (m) | q' (KN/m ²) | φ (°) | N _q | f _D | qp (MN/m ²) | Ap (m ²) | Qp (t) |
|-----------|----------|-------------------------|-------|----------------|----------------|-------------------------|----------------------|--------|
| 2,25 | 0.00 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 0.00 |
| 2,40-2,70 | 0.45 | 7.97 | 36 | 39.49 | 0.83 | 0.94 | 0.16 | 15.33 |
| 2,85-3,15 | 0.90 | 15.93 | 37 | 43.54 | 0.83 | 2.07 | 0.16 | 33.81 |
| 3,30-3,60 | 1.35 | 23.90 | 37 | 44.64 | 0.83 | 3.19 | 0.16 | 52.00 |
| 3,75-4,05 | 1.80 | 31.86 | 38 | 46.86 | 0.83 | 4.46 | 0.16 | 72.79 |
| 4,20-4,50 | 2.25 | 39.83 | 38 | 48.94 | 0.83 | 5.82 | 0.16 | 95.01 |
| 4,65-4,95 | 2.70 | 47.79 | 38 | 49.56 | 0.83 | 7.08 | 0.16 | 115.46 |
| 5,10-5,40 | 3.15 | 55.76 | 38 | 49.98 | 0.83 | 8.33 | 0.16 | 135.86 |
| 5,55-5,85 | 3.60 | 63.62 | 38 | 49.66 | 0.83 | 9.44 | 0.16 | 154.02 |
| 6,00-6,30 | 4.05 | 63.90 | 38 | 50.11 | 0.83 | 9.57 | 0.16 | 156.10 |

CALCULO DE CAPACIDAD DE CARGA POR FUSTE - MÉTODO TEÓRICO

Propuesta por Meyerhof

Tesis : Evaluación de capacidad de carga de pilotes mediante métodos teóricos y semiempíricos para el Desembarcadero Pesquero Artesanal de Cerro Azul, Cañete

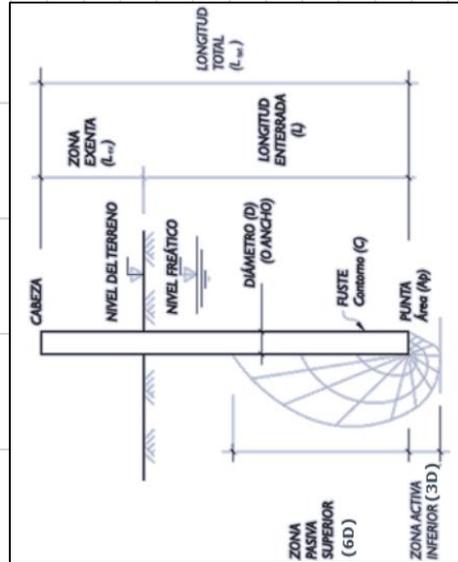
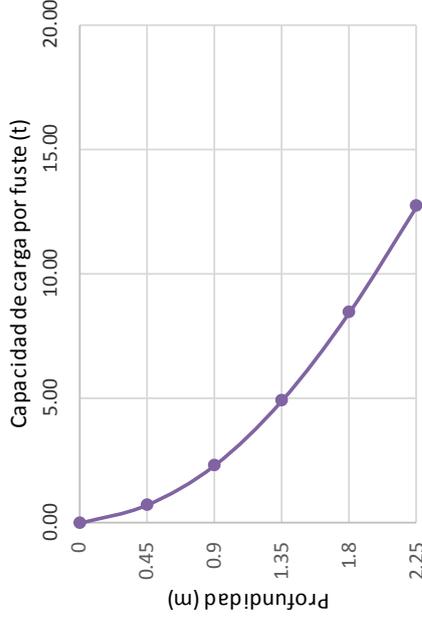
Autora : Bach. Lourdes Milagros Gavidia Pinedo

| | | | |
|------------------------------|------------|----------------------------|---------------|
| Datos del Pilote | | Datos del estudio de campo | |
| Tipo de sección | : Cuadrada | Fecha | : 08/02/2018 |
| Lado (m) | : 0.4 | Distrito | : Cerro Azul |
| Área punta (m ²) | : 0.16 | Provincia | : Cañete |
| Perímetro (m) | : 1.6 | Región | : Lima |
| Diámetro eq. (m) | : 0.51 | Coordenadas UTM | |
| Instalación | : Hincado | Norte | : 8559986.144 |
| Material | : Concreto | Este | : 339078.253 |
| Tipo de suelo | : Granular | | |

Formulaciones:

$$Q_f = \sum q_f \cdot A_f \qquad q_f = K \cdot q' \cdot \tan \delta$$

Método Teórico - Qf Meyerhof



| Registro | Prof (m) | q' (KN/m ²) | φ (°) | K | qf (KN/m ²) | Af (m ²) | Qf (t) | ΣQf (t) |
|-----------|----------|-------------------------|-------|-----|-------------------------|----------------------|--------|---------|
| 0,00 | 0,00 | -- | -- | -- | -- | -- | 0,00 | 0,00 |
| 0,15-0,45 | 0,45 | 7,39 | 31 | 1,5 | 9,93 | 0,72 | 0,73 | 0,73 |
| 0,60-0,90 | 0,9 | 14,78 | 32 | 1,5 | 21,55 | 0,72 | 1,58 | 2,31 |
| 1,05-1,35 | 1,35 | 22,17 | 36 | 1,5 | 35,51 | 0,72 | 2,61 | 4,92 |
| 1,50-1,80 | 1,8 | 29,56 | 37 | 1,5 | 48,34 | 0,72 | 3,55 | 8,47 |
| 1,95-2,25 | 2,25 | 36,95 | 36 | 1,5 | 58,22 | 0,72 | 4,27 | 12,74 |

CALCULO DE CAPACIDAD DE CARGA POR FUSTE - MÉTODO TEÓRICO

ROM Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias

Tesis : Evaluación de capacidad de carga de pilotes mediante métodos teóricos y semiempíricos para el Desembarcadero Pesquero Artesanal de Cerro Azul, Cañete

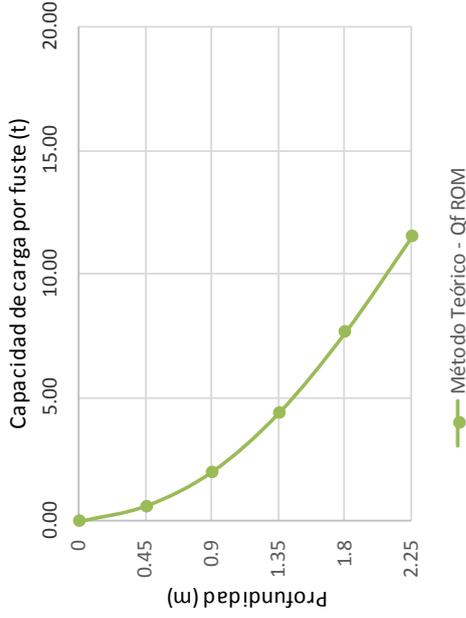
Autora : Bach. Lourdes Milagros Gavidia Pinedo

| Datos del Pilote | | Datos del estudio de campo | |
|------------------------------|------------|----------------------------|---------------|
| Tipo de sección | : Cuadrada | Fecha | : 08/02/2018 |
| Lado (m) | : 0.4 | Distrito | : Cerro Azul |
| Área punta (m ²) | : 0.16 | Provincia | : Cañete |
| Perímetro (m) | : 1.6 | Región | : Lima |
| Diámetro eq. (m) | : 0.51 | Coordenadas UTM | |
| Instalación | : Hincado | Norte | : 8559986.144 |
| Material | : Concreto | Este | : 339078.253 |
| Tipo de suelo | : Granular | | |

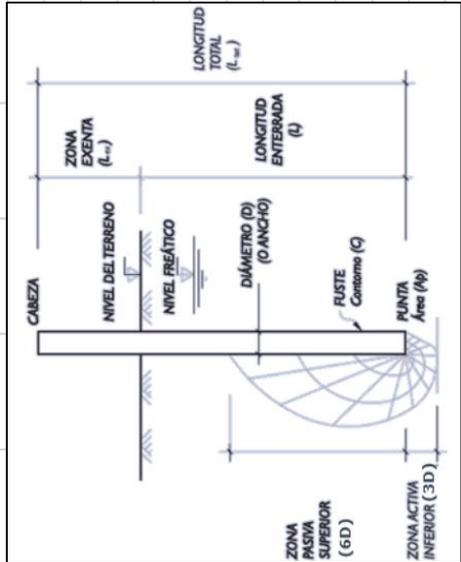
$$Q_f = \sum q_f \cdot A_f$$

$$q_f = q' \cdot K \cdot f \cdot \tan \phi$$

Método Teórico - Qf ROM



| Registro | Prof (m) | q' (KN/m ²) | φ (°) | K | qf (KN/m ²) | Af (m ²) | Qf (t) | ΣQf (t) |
|----------|-----------|-------------------------|-------|------|-------------------------|----------------------|--------|---------|
| SPT (m) | 0,00 | -- | -- | -- | -- | -- | 0.00 | 0.00 |
| | 0,15-0,45 | 7.39 | 31 | 0.75 | 8.53 | 0.72 | 0.63 | 0.63 |
| | 0,60-0,90 | 14.78 | 32 | 0.75 | 18.96 | 0.72 | 1.39 | 2.02 |
| | 1,05-1,35 | 22.17 | 36 | 0.75 | 32.36 | 0.72 | 2.38 | 4.39 |
| | 1,50-1,80 | 29.56 | 37 | 0.75 | 44.44 | 0.72 | 3.26 | 7.66 |
| | 1,95-2,25 | 36.95 | 36 | 0.75 | 52.71 | 0.72 | 3.87 | 11.53 |



CALCULO DE CAPACIDAD DE CARGA POR PUNTA - MÉTODO SEMIEMPIRICO

Propuesta por Meyerhof

Tesis : Evaluación de capacidad de carga de pilotes mediante métodos teóricos y semiempíricos para el Desembarcadero Pesquero Artesanal de Cerro Azul, Cañete

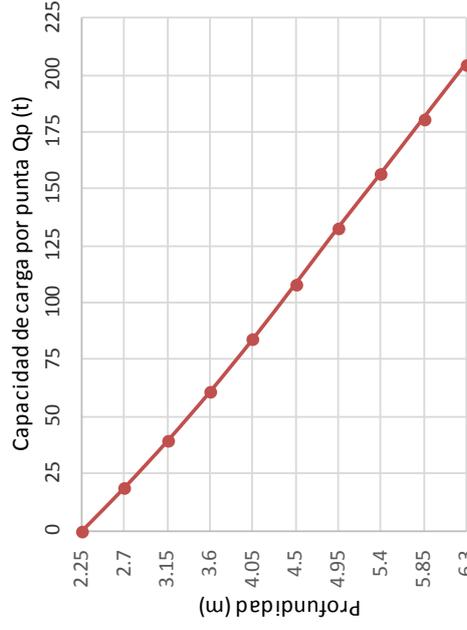
Autora : Bach. Lourdes Milagros Gavidia Pinedo

Datos del Pilote : Cuadrada
 Tipo de sección : 0.4
 Lado (m) : 0.16
 Área punta (m²) : 1.6
 Perímetro (m) : 0.51
 Diámetro eq. (m) : Hincado
 Instalación : Concreto
 Material : Granular

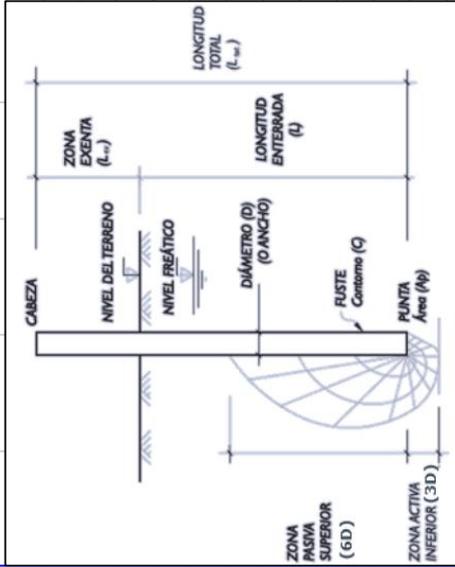
Datos del estudio de campo
 Fecha : 08/02/2018
 Distrito : Cerro Azul
 Provincia : Cañete
 Región : Lima
 Coordenadas UTM
 Norte : 8559986.144
 Este : 339078.253

$$Q_p = q_p \cdot A_p$$

$$q_p = 0.04 \cdot N_{60} \cdot \frac{L}{D} \leq 0.4 \cdot N_{60} \cdot MN/m^2$$



| Registro | Prof (m) | N60 | N60prom | L (m) | D (m) | qp (MN/m ²) | Ap (m ²) | Qp (t) |
|-----------|----------|-----|---------|-------|-------|-------------------------|----------------------|--------|
| 2,25 | 0.00 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 0.00 |
| 2,40-2,70 | 0.45 | 33 | 33.10 | 0.45 | 0.51 | 1.17 | 0.16 | 19.06 |
| 2,85-3,15 | 0.90 | 36 | 34.17 | 0.90 | 0.51 | 2.41 | 0.16 | 39.35 |
| 3,30-3,60 | 1.35 | 36 | 35.28 | 1.35 | 0.51 | 3.74 | 0.16 | 60.95 |
| 3,75-4,05 | 1.80 | 38 | 36.43 | 1.80 | 0.51 | 5.14 | 0.16 | 83.90 |
| 4,20-4,50 | 2.25 | 39 | 37.55 | 2.25 | 0.51 | 6.63 | 0.16 | 108.11 |
| 4,65-4,95 | 2.70 | 39 | 38.42 | 2.70 | 0.51 | 8.14 | 0.16 | 132.76 |
| 5,10-5,40 | 3.15 | 40 | 38.82 | 3.15 | 0.51 | 9.59 | 0.16 | 156.48 |
| 5,55-5,85 | 3.60 | 40 | 39.23 | 3.60 | 0.51 | 11.08 | 0.16 | 180.70 |
| 6,00-6,30 | 4.05 | 40 | 39.51 | 4.05 | 0.51 | 12.55 | 0.16 | 204.75 |



CALCULO DE CAPACIDAD DE CARGA POR PUNTA - MÉTODO SEMIEMPIRICO

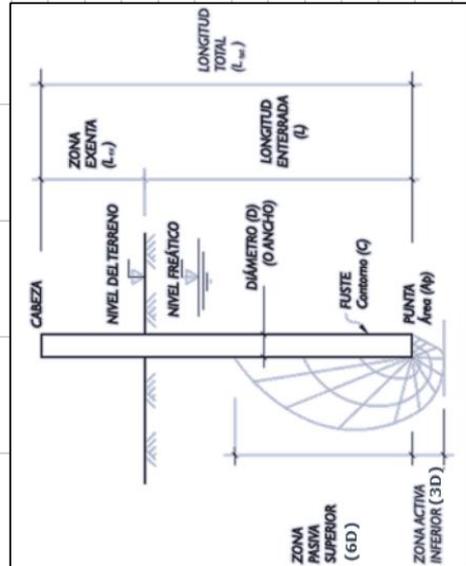
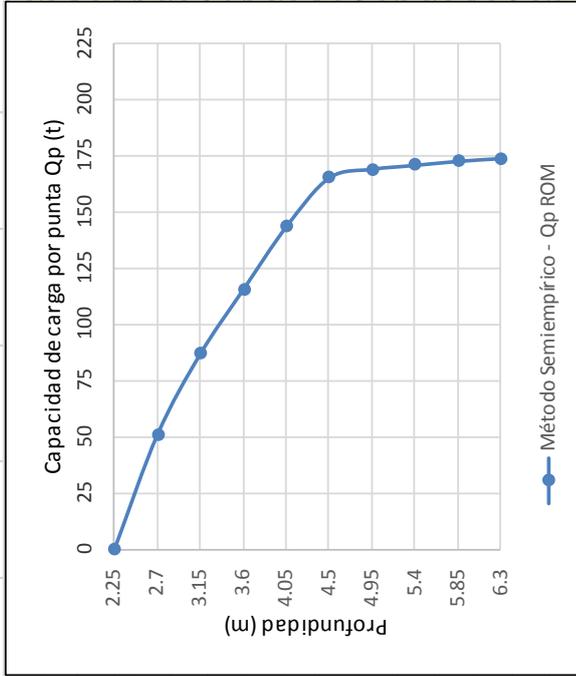
ROM Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias

Tesis : Evaluación de capacidad de carga de pilotes mediante métodos teóricos y semiempíricos para el Desembarcadero Pesquero Artesanal de Cerro Azul, Cañete

Autora : Bach. Lourdes Milagros Gavidia Pinedo

| | |
|-------------------------------------|----------------------------|
| Datos del Pilote | Datos del estudio de campo |
| Tipo de sección : Cuadrada | Fecha : 08/02/2018 |
| Lado (m) : 0.4 | Distrito : Cerro Azul |
| Área punta (m ²) : 0.16 | Provincia : Cañete |
| Perímetro (m) : 1.6 | Región : Lima |
| Diámetro eq. (m) : 0.51 | Coordenadas UTM |
| Instalación : Hincado | Norte : 8559986.144 |
| Material : Concreto | Este : 339078.253 |
| Tipo de suelo : Granular | |

Formulaciones:
 $Q_p = q_p \cdot A_p$
 $q_p = \alpha \cdot N_{\epsilon 0prom} \quad \alpha = \left(0.1 + \frac{D_{50}}{D_r}\right) \cdot f_D \leq 0.4$



| Registro | Prof (m) | α | N60prom | D50 (mm) | f_D | qp (MN/m ²) | Ap (m ²) | Qp (t) |
|-----------|----------|----------|---------|----------|-------|-------------------------|----------------------|--------|
| 2,25 | 0.00 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 0.00 |
| 2,40-2,70 | 0.45 | 0.27 | 11.59 | 0.45 | 0.83 | 3.13 | 0.16 | 51.00 |
| 2,85-3,15 | 0.90 | 0.27 | 19.76 | 0.45 | 0.83 | 5.33 | 0.16 | 86.97 |
| 3,30-3,60 | 1.35 | 0.27 | 26.26 | 0.45 | 0.83 | 7.08 | 0.16 | 115.59 |
| 3,75-4,05 | 1.80 | 0.27 | 32.61 | 0.45 | 0.83 | 8.80 | 0.16 | 143.52 |
| 4,20-4,50 | 2.25 | 0.27 | 37.55 | 0.45 | 0.83 | 10.13 | 0.16 | 165.26 |
| 4,65-4,95 | 2.70 | 0.27 | 38.42 | 0.45 | 0.83 | 10.36 | 0.16 | 169.11 |
| 5,10-5,40 | 3.15 | 0.27 | 38.82 | 0.45 | 0.83 | 10.47 | 0.16 | 170.85 |
| 5,55-5,85 | 3.60 | 0.27 | 39.23 | 0.45 | 0.83 | 10.58 | 0.16 | 172.64 |
| 6,00-6,30 | 4.05 | 0.27 | 39.51 | 0.45 | 0.83 | 10.66 | 0.16 | 173.88 |

CALCULO DE CAPACIDAD DE CARGA POR FUSTE - MÉTODO SEMIEMPIRICO

Propuesta por Meyerhof

Tesis : Evaluación de capacidad de carga de pilotes mediante métodos teóricos y semiempíricos para el Desembarcadero Pesquero Artesanal de Cerro Azul, Cañete

Autora : Bach. Lourdes Milagros Gavidia Pinedo

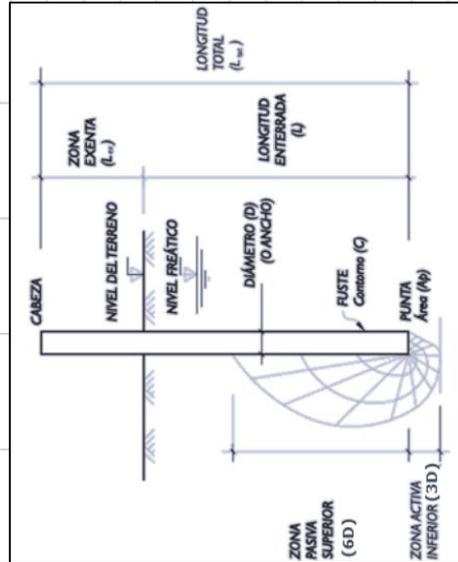
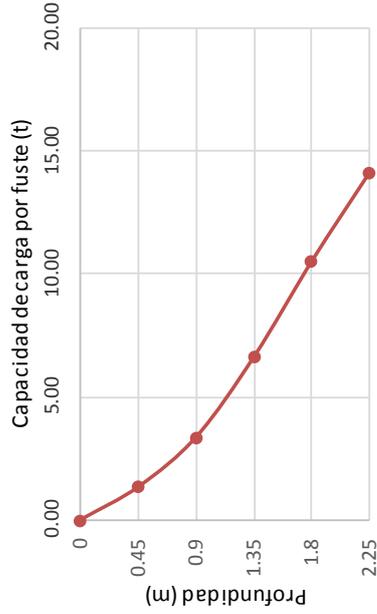
| | | | |
|------------------|------------|----------------------------|---------------|
| Datos del Pilote | | Datos del estudio de campo | |
| Tipo de sección | : Cuadrada | Fecha | : 08/02/2018 |
| Lado (m) | : 0.4 | Distrito | : Cerro Azul |
| Área punta (m2) | : 0.16 | Provincia | : Cañete |
| Perímetro (m) | : 1.6 | Región | : Lima |
| Diámetro eq. (m) | : 0.51 | Coordenadas UTM | |
| Instalación | : Hincado | Norte | : 8559986.144 |
| Material | : Concreto | Este | : 339078.253 |
| Tipo de suelo | : Granular | | |

Formulaciones:

$$Q_f = \sum q_f \cdot A_f$$

$$q_f = 2 \cdot N_{60prom}$$

Método Semiempírico - Qf Meyerhof



| Registro | Prof (m) | q' (KN/m2) | φ (°) | N60 | qf (KN/m2) | Af (m2) | Qf (t) | ΣQf (t) |
|-----------|----------|------------|-------|-----|------------|---------|--------|---------|
| 0,00 | 0.00 | -- | -- | -- | -- | -- | 0.00 | 0.00 |
| 0,15-0,45 | 0.45 | 7.39 | 31 | 12 | 18.32 | 0.72 | 1.35 | 1.35 |
| 0,60-0,90 | 0.9 | 14.78 | 32 | 19 | 27.76 | 0.72 | 2.04 | 3.38 |
| 1,05-1,35 | 1.35 | 22.17 | 36 | 30 | 44.58 | 0.72 | 3.27 | 6.66 |
| 1,50-1,80 | 1.8 | 29.56 | 37 | 35 | 53.00 | 0.72 | 3.89 | 10.55 |
| 1,95-2,25 | 2.25 | 36.95 | 36 | 33 | 49.16 | 0.72 | 3.61 | 14.16 |

CALCULO DE CAPACIDAD DE CARGA POR FUSTE - MÉTODO SEMIEMPIRICO

ROM Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias

Tesis : Evaluación de capacidad de carga de pilotes mediante métodos

teóricos y semiempíricos para el Desembarcadero Pesquero Artesanal de Cerro Azul, Cañete

Autora : Bach. Lourdes Milagros Gavidia Pinedo

| Datos del Pilote | | Datos del estudio de campo | |
|------------------------------|------------|----------------------------|---------------|
| Tipo de sección | : Cuadrada | Fecha | : 08/02/2018 |
| Lado (m) | : 0.4 | Distrito | : Cerro Azul |
| Área punta (m ²) | : 0.16 | Provincia | : Cañete |
| Perímetro (m) | : 1.6 | Región | : Lima |
| Diámetro eq. (m) | : 0.51 | Coordenadas UTM | |
| Instalación | : Hincado | Norte | : 8559986.144 |
| Material | : Concreto | Este | : 339078.253 |

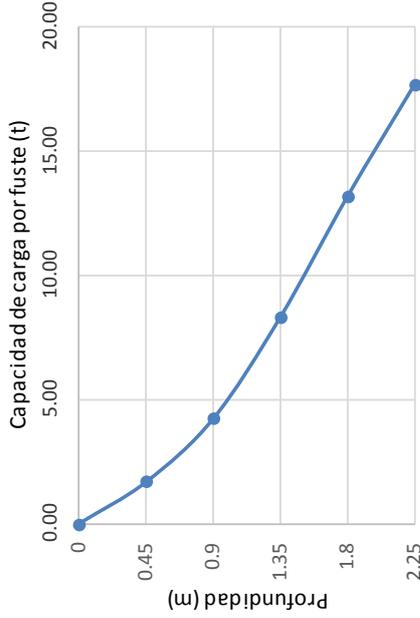
Tipo de suelo : Granular

Formulaciones:

$$Q_f = \sum q_f \cdot A_f$$

$$q_f = 2.5 \cdot N_{60}$$

Método Semiempírico - Qf ROM



—●— Método Semiempírico - Qf ROM

| Registro | Prof (m) | q' (KN/m ²) | φ (°) | N60 | qf (KN/m ²) | Af (m ²) | Qf (t) | ΣQf (t) |
|-----------|----------|-------------------------|-------|-----|-------------------------|----------------------|--------|---------|
| 0,00 | 0,00 | -- | -- | -- | -- | -- | 0,00 | 0,00 |
| 0,15-0,45 | 0,45 | 7,39 | 31 | 12 | 22,90 | 0,72 | 1,68 | 1,68 |
| 0,60-0,90 | 0,9 | 14,78 | 32 | 19 | 34,70 | 0,72 | 2,55 | 4,23 |
| 1,05-1,35 | 1,35 | 22,17 | 36 | 30 | 55,73 | 0,72 | 4,09 | 8,32 |
| 1,50-1,80 | 1,8 | 29,56 | 37 | 35 | 66,26 | 0,72 | 4,86 | 13,19 |
| 1,95-2,25 | 2,25 | 36,95 | 36 | 33 | 61,46 | 0,72 | 4,51 | 17,70 |

