UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Evaluación de la capacidad de carga axial de pilotes tubulares de acero instalados en estratos de arena limosa y grava arenosa del puerto del Callao; utilizando métodos analíticos y resultados de prueba de carga dinámica

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES

Borda Hinostroza, José Mauricio (0000-0002-6495-8707)

Paucar Medina, Ibrayn Guillermo (0000-0003-2348-9294)

ASESOR

Durán Ramírez, Gary Gary (0000-0002-2011-7463)

Lima, 21 de Julio de 2020

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios y a mi familia.

Ibrayn Paucar

Este proyecto de grado está dedicado a mis padres, en agradecimiento al apoyo incondicional que me brindaron y las oportunidades brindadas.

José Borda

AGRADECIMIENTOS

La persona que amerita nuestro especial agradecimiento es el Ing. Gary Durán, por la asesoría continua, tiempo dedicado e interés por el desarrollo de esta investigación. De la misma forma agradecemos a la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas por habernos brindado la oportunidad de seguir desarrollando nuestras aptitudes técnicas y profesionales.

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a la empresa, consultora peruana en Ingeniería Geotécnica, MR & Asociados SAC (MRA) por brindarnos el apoyo con la información necesaria para el desarrollo de nuestra tesis. Especialmente al Ing. Jhonatan Flores – Jefe de Proyectos de MRA por su disposición en apoyar la investigación académica universitaria.

RESUMEN

Una de las partes más importantes y complejas en el diseño de pilotes es el cálculo de su capacidad de carga axial debido al comportamiento impredecible del suelo y a las diversas metodologías disponibles para estimar esta capacidad portante. En consecuencia, los profesionales encargados de esta labor suelen tener complicaciones en la selección de la metodología a utilizar y terminan haciendo uso de su experiencia y confianza en determinadas metodologías para el proceso de selección; sin embargo, el seleccionado no necesariamente es el más adecuado para las condiciones geotécnicas que se tiene. Por otro lado, las pruebas de carga dinámica o “Pile Dynamic Analysis” (PDA) sumados a los métodos de análisis de onda “Case Pile Wave Analysis Program” (CAPWAP) son utilizados cada vez con mayor frecuencia para validar en campo la longitud de los pilotes y la capacidad de carga real que estos desarrollan. Para el presente trabajo se utilizaron los datos de 2 pilotes de acero tubular de 812.8 mm de diámetro y 18 mm y espesor, que fueron hincados en suelo costero constituido por estratos de arena limosa y grava cuyas capacidades de carga se conocen debido a los ensayos PDA. Posteriormente, se utilizaron las metodologías analíticas para estimar la capacidad de carga axial por punta y fuste de los pilotes. Luego se compararon con los resultados obtenidos del PDA para obtener así las metodologías que se aproximan numéricamente a los resultados de las pruebas y en consecuencia las más adecuadas para el tipo de suelo analizado.

Palabras clave: Pilote de acero; prueba de carga; capacidad de carga; capacidad por fuste; capacidad por punta; métodos; esfuerzo.

**Evaluation of the axial load capacity of steel tubular piles installed
in layers of silty sand and sandy gravel of Callao port, using analytical
methods and dynamic load test results**

ABSTRACT

One of the most important and difficult part in the design of piles is estimate axial load capacity for those structural elements. This difficulty and complexity is caused by the unpredictable behavior of the soil and many methodologies that exist to estimate the load capacity of the piles. The professionals in charged for this work often have complications in the selection of methods and try to use their experience to select one of those, however this one couldn't be the ideal method for the analyzed soil. On the other hand, dynamic load tests and the "Analysis of the stack wave analysis" (CAPWAP) are increasingly frequent to validate the length and the real load capacity. In this work we have used data from 2 pilots of tubular steel of 812.8 mm in diameter and 18 mm and wall thickness, which have been used in coastal soil consisting mainly of sandy gravel and silty sand. Then, we created a database of soil geotechnical parameters and results of axial load capacity for tip and fuse of PDA tests. Later, analytical and empirical methodologies will be analyzed to estimate the capacity of axial load by tip and shaft of tubular steel piles. Finally, the results of the tasks of the PDA are compared and the values of the estimated load capacity that are obtained from the most appropriate methodologies for the type of soil analyzed in the tip and shaft calculation are compared.

Keywords: Steel Pile; load test; load capacity; load skin; load point; methods; stress.

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	10
1.1	ANTECEDENTES	10
1.2	REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	11
1.3	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	12
1.4	HIPÓTESIS.....	12
1.5	OBJETIVO GENERAL	13
1.6	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.7	DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO.....	13
2	MARCO TEÓRICO.....	14
2.1	DEFINICIÓN DE PILOTES	14
2.2	TIPO DE PILOTES	15
2.2.1	Pilotes de concreto.....	15
2.2.2	Pilotes de acero.....	17
2.2.3	Pilotes de madera.....	17
2.3	CLASIFICACIÓN SEGÚN SU FUNCIONAMIENTO	18
2.3.1	Pilotes de aporte por punta	18
2.3.2	Pilotes de aporte por fricción.....	18
2.3.3	Pilotes de combinación de punta y fricción.....	19
2.3.4	Análisis estático de transferencia de carga	19
2.4	MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE CAPACIDAD DE CARGA	20
2.4.1	Método para el cálculo de capacidad de carga por punta (Qp)	20
2.4.2	Métodos para el cálculo de capacidad de carga por fricción (Qs).....	27
2.5	PRUEBA DE CARGA DINÁMICA	33
2.5.1	Equipo utilizado para las pruebas de carga dinámica.....	34
2.5.2	Método CASE.....	35
2.5.3	Propagación de onda del método CASE.....	36
2.5.4	Análisis CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program).....	37
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
3.1	MATERIAL	38
3.1.1	Población	38

3.1.2	Muestra	38
3.1.3	Método.....	38
3.1.4	Variable de estudio y operacionalización	39
3.1.5	Técnica e instrumentación de recolección de datos.....	40
3.1.6	Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	40
3.1.7	Información utilizada.....	40
4	RESULTADOS	48
4.1	CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE CARGA.....	48
4.1.1	Cálculo de la capacidad de carga por punta	48
4.1.2	Cálculo de la capacidad de carga por fuste.....	50
4.2	EVALUACIÓN COMPARATIVA DE CAPACIDAD DE CARGA CALCULADA VS RESULTADOS DE PDA.....	52
4.2.1	Evaluación comparativa para punta.....	52
4.2.2	Evaluación comparativa para fuste.....	56
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	60
5.1	EVALUACIÓN COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS ANALÍTICOS Y RESULTADOS DE ENSAYOS DE CARGA PARA PUNTA	60
5.2	EVALUACIÓN COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS Y RESULTADOS DE ENSAYOS DE CARGA PARA FUSTE	61
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
8	ANEXOS.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:Factores de adherencia	30
Tabla 2:Tabla de variables de investigación.....	39
Tabla 3:Perfil estratigráfico del pilote P-1	41
Tabla 4:Resultados de prueba de carga dinámica al pilote P-1	44
Tabla 5:Perfil estratigráfico del pilote P-2	44
Tabla 6:Perfil estratigráfico el pilote P-2 (continuación de la Tabla 13)	45
Tabla 7:Resultados de las pruebas de carga dinámica del pilote P-2	48
Tabla 8:Resultados de capacidad de carga por punta considerando formación de tapón (KN)	49
Tabla 9:Resultados de capacidad de carga por punta sin considerar tapón (KN)	49
Tabla 10:Resultados de capacidad de carga por fuste (KN).....	51
Tabla 11:Comparación de capacidad de carga por fuste. Métodos analíticos vs PDA pilote P-1.....	57
Tabla 12:Comparación de capacidad de carga por fuste. Métodos analíticos vs PDA pilote P-2.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de pilotes fabricados in situ. Adaptado de “Fundamentos de ingeniería de cimentaciones”, por Das, 2012	16
Figura 2: Pilotes por carga de punta a) pilote apoyado; b) pilote empotrado. Adaptado de "Fundamentos de ingeniería de cimentaciones", por Das, 2012	18
Figura 3: Pilote por fricción. Adaptado de "Fundamentos de ingeniería de cimentaciones", por Das, 2012.....	19
Figura 4:Mecanismo de transferencia de carga y naturaleza de variación de la resistencia en el fuste. Adaptado de "Fundamentos de ingeniería de cimentaciones", por Das, 2012	20
Figura 5:Naturaleza de variación de la resistencia por punta en un suelo arenoso. Adaptado de "Fundamentos de ingeniería de cimentaciones", por Das, 2012.....	22
Figura 6:Ángulo de Falla de Hanbu. Adaptado de "Foundation Analysis and Design", por Bowles, 1996	25
Figura 7:Variación de N_q^* con L/D . Adaptado de "Fundamentos de ingeniería de cimentaciones", por Das, 2012	26
Figura 8:Tabla de ángulo de fricción entre varios materiales y distintos tipos de suelo. Adaptado de "Foundation analysis and design", por Bowles, 1996	29
Figura 9:Abaco de factor de adherencia Barreto. Adaptado de "Evaluación comparativa de la capacidad de carga de cimentaciones profundas. Fórmulas analíticas y ensayos de carga", por Barreto, 2011	31
Figura 10:Esquema de esfuerzo vertical efectivo medio para un pilote hincado. Adaptado de "Fundamentos de ingeniería de cimentaciones", por Das, 2012	33
Figura 11:Sensores acelerómetros y deformímetros. Adaptado de Pile Dynamic Inc.	34
Figura 12: Sensores instalados en cabeza del pilote de acero. Adaptado de Pile Dynamic Inc.	34
Figura 13:Analizado de instalación de pilotes. Adaptado de Pile Dynamic Inc.	35
Figura 14:Curvas de fuerza y velocidad vs tiempo para un pilote con mayor resistencia por punta. Adaptado de Lara, 2014.....	36
Figura 15:Curvas de fuerza y velocidad vs tiempo para un pilote con mayor resistencia por fuste. Adaptado de Lara, 2014.....	37
Figura 16:Modelo geotécnico del pilote P-1. Fuente propia.	43
Figura 17:Modelo geotécnico del pilote P-2. Fuente propia	47

Figura 18:Comparativo de capacidad de carga de métodos analíticos vs PDA considerando formación de tapón pilote P-1. Fuente propia	52
Figura 19:Comparativo de capacidad de carga de métodos analíticos vs PDA considerando la no formación de tapón pilote P-1. Fuente propia	53
Figura 20:Incidencia porcentual de los factores N_y^* y N_q^* a la capacidad por punta pilote P-1. Fuente propia.....	54
Figura 21:Comparativo de capacidad de carga de métodos analíticos vs PDA considerando formación de tapón pilote P-2. Fuente propia	54
Figura 22:Comparativo de capacidad de carga de métodos analíticos vs PDA considerando la no formación de tapón pilote P-2. Fuente propia	55
Figura 23:Incidencia porcentual de los factores N_y^* y N_q^* a la capacidad por punta pilote P-2. Fuente propia.....	56
Figura 24:Capacidad de carga por fuste. Métodos analíticos vs PDA pilote P-1. Fuente propia	56
Figura 25:Capacidad de carga por fuste. Métodos analíticos vs PDA pilote P-2. Fuente propia	58
Figura 26:Tabla de ángulos de fricción entre material del pilote y suelo usado para grava. Adaptado de los autores API, Meyerhof, Burlan y Mansur & Hunter.	62
Figura 27:Ángulos de fricción entre material del pilote y suelo usados para grava. Adaptada de los autores Meyerhof, Burland y Mansur & Hunter	62

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La cimentación con pilotes es utilizada cuando se desea transferir cargas a un estrato de suelo resistente, siempre y cuando los estratos superiores no posean la capacidad de carga necesaria para soportar las estructuras a construir. En el Perú, existe gran diversidad de suelos y tipo de proyectos, tal que en algunos casos es necesario la aplicación de pilotes como método de cimentación, casos donde se requiere que el pilote demuestre un rendimiento similar al estimado en el diseño, es decir, que no se haya sobrestimado o subestimado las dimensiones del pilote resultando en una capacidad de carga mucho mayor o menor a la que se requería del proyecto.

Siendo esta problemática ya abordada por distintos investigadores en el área de las cimentaciones profundas a nivel mundial, por ejemplo, Barreto (2013) sostiene que las metodologías convencionales para el diseño de cimentaciones profundas están regidas por el desarrollo de expresiones matemáticas que se basan en principios de la mecánica de suelos, para poder dimensionar los pilotes con un factor de seguridad ante las fallas por capacidad de carga y asentamiento. Sin embargo, los valores resultantes generalmente difieren con los valores obtenidos de los ensayos de carga, siendo los últimos considerados como los valores reales. Por tal motivo, Barreto en su investigación recolecta información sobre los parámetros geotécnicos de distintos pilotes ya construidos, para poder comparar los resultados obtenidos de las distintas metodologías de estimación de carga de pilotes con los valores resultantes de los ensayos de carga dinámicos a los pilotes de prueba. Dando como resultado una lista de las metodologías de cálculo que mejor representan el comportamiento del suelo y pilote para los diferentes suelos de su país, Colombia.

También, en la investigación de Shooshpasha, Hasanzadeh y Taghavi (2013) resaltan la falta de modelos analíticos adecuados para predecir la capacidad de carga de pilotes, siendo esta la principal razón para que el ingeniero geotécnico este en constante búsqueda de una solución a esta problemática. Además, escribe sobre la importancia de conocer un método idóneo para el cálculo de capacidades de carga para un suelo específico, pues este garantiza seguridad en el diseño y el ahorro económico en la construcción, debido al mayor parecido con la realidad que se logrará. Por lo que, el autor centra su estudio en los suelos de Irán, tal que realizó una recolección de datos de distintos proyectos de pilotaje, para luego ingresar estos datos y desarrollar la metodología de cálculo de capacidad de carga de pilotes, cálculos

que serán comparados y clasificados por su similitud a los resultados obtenidos por medio de los ensayos de prueba de carga estática, dinámica y el modelamiento del terreno en software MEF (Modelo de Elementos Finitos). Dando como resultado la variación entre los distintos métodos de cálculo.

Por otro lado, el trabajo de Momenia, Maizir, Gofar y Nazir (2013) sostiene que es necesario validar los diseños de pilotes, es decir, comparar los resultados obtenidos por los ensayos de carga con los calculados con las diferentes metodologías de diseño convencionales, porque estas tienen su origen en el empirismo y son específicas de su lugar de origen. Tal necesidad motivó al autor a realizar un estudio comparativo para proponer una metodología alternativa al ensayo de prueba de carga estática, por requerir una alta inversión de tiempo, dinero y espacio, lo que limitaba las futuras investigaciones por la falta de datos.

En la misma área, se encuentra la investigación de Rajagopal, Solanki y Tandel (2012), que de igual manera resalta la diferencia entre los valores obtenidos en gabinete (metodología convencionales) con los valores que resultan de aplicar los ensayos de pruebas de carga estática y dinámica a un conjunto de pilotes de prueba y a sus estratos de cimentación, así mismo, propone al ensayo de prueba de carga dinámica (PDA) como una mejor opción para calcular la capacidad real del pilote en campo, ya que también provee información sobre la condición actual del pilote ya hincado.

En conclusión, los antecedentes han demostrado que las metodologías ya establecidas para el cálculo de capacidad de carga de pilotes deben de ser adecuadas al suelo donde se desarrollarán los proyectos, ya que éstas han sido diseñadas para suelos de lugares específicos. Este problema se ve representado en la diferencia que existe entre las capacidades de carga teóricas estimadas con las metodologías de cálculo y la capacidad de carga real obtenida de los ensayos de prueba de carga dinámica aplicados a los pilotes. Tal que, este problema tomo tal relevancia en la ingeniería geotécnica, para que los diferentes autores realicen investigaciones con la finalidad de identificar las metodologías que se adecuen con mayor precisión a los suelos de cimentación en sus proyectos.

1.2 Realidad Problemática

La precisión de las metodologías con las que trabaja la ingeniería geotécnica resulta menor en comparación con las utilizadas en otras áreas de la ingeniería civil. Esto debido al comportamiento complejo de los suelos, la heterogeneidad de los materiales y la interacción

del sistema suelo – estructura. En la realidad peruana, de acuerdo con Urbina (2004) los cálculos geotécnicos han sido y siguen siendo blanco de incertidumbres debido a que los métodos utilizados para la estimación de carga en pilotes se basan en teoría que fueron creadas en base a experiencias en suelos extranjeros. Por otro lado, durante los ensayos de carga dinámica (PDA) realizados en pilotes instalados, se comprobó que los valores de capacidad de carga difieren de los calculados por los métodos teóricos y esta diferencia se debe a que los métodos no están ajustados a las características de los suelos del Perú. Lo que ha llevado a que en nuestro país la mayoría de ingenieros realicen diseños típicos, dejando de lado la ciencia que conlleva a una optimización y diseño eficiente de pilotes (Urbina, 2004). Esto quiere decir que los ingenieros debido a la incertidumbre optan por la utilización de factores de seguridad más elevados para prevenir las fallas por corte y asentamiento, lo que ocasiona en la mayoría de los casos el sobredimensionamiento de las estructuras del pilote y un sobre costo en los proyectos de construcción. Además, los ensayos de pruebas de carga estática o dinámica no son comúnmente realizados en proyectos pequeños e incluso medianos, ya que estas implican un costo. Por tal motivo, se justifica la necesidad de contar con una metodología para estimar la capacidad de carga en pilotes adecuada a los estratos de fundación en el Perú. A partir de esta investigación se identificarán las metodologías de cálculo que estimen con mayor precisión la capacidad de carga axial de los pilotes, y por lo tanto, serán las más adecuadas para el tipo de suelo analizado.

1.3 Formulación del problema

Es así que se formuló la siguiente pregunta, ¿cuál es la metodología de cálculo, entre métodos analíticos, que estime valores de capacidad de carga más cercanos a los valores obtenidos de las pruebas de carga dinámica (PDA) para pilotes de acero tubular instalados en suelo costero conformado por estratos de arenas limosas y grava arenosa?

1.4 Hipótesis

Mediante la comparación de las capacidades de carga axial estimadas por metodologías analíticas y los valores de capacidad de carga obtenidos de las pruebas de carga dinámica. Se puede determinar qué metodologías analíticas son las más precisas en el cálculo de la capacidad de carga por punta y fuste en pilotes de acero tubular instalados en suelo costero conformado por estratos de arenas limosas y grava arenosa.

1.5 Objetivo General

Determinar las metodologías analíticas que estimen los valores de capacidad de carga para punta y fuste más cercanos a las capacidades de carga obtenidas de las pruebas de carga dinámica (PDA) en pilotes de acero tubulares instalados en suelo costero conformado por estratos de arenas limosas y grava arenosa.

1.6 Objetivos específicos

- Estimar la capacidad de carga por punta y fuste de los pilotes estudiados utilizando las metodologías analíticas.
- Comparar la capacidad de carga axial por punta y fuste obtenidos de las metodologías analíticas con los valores obtenidos de los PDA.
- Determinar las metodologías que resulten en valores numéricos más cercanos a la capacidad de carga axial por punta y fuste obtenidos de los PDA.

1.7 Descripción del contenido

La presente investigación se estructura de la siguiente manera. En la primera parte se comenta sobre los antecedentes del problema que demuestran la necesidad de determinar una metodología de cálculo de capacidad de carga de pilotes adecuada a los suelos del Perú. En el Capítulo 1, se presenta la teoría de cimentaciones profundas donde se describen las diferentes metodologías que existen para la estimación de capacidad carga de pilotes, además de la base teórica de los ensayos PDA. En el Capítulo 2, se describe la información utilizada que incluye parámetros geotécnicos y resultados de ensayos PDA realizados a dos pilotes hincados en el suelo analizado. Además, se describe el tipo de metodología e investigación utilizada. Seguidamente, en el Capítulo 3, se realizó el cálculo de la capacidad de carga de los pilotes utilizando las metodologías analíticas (punta y fuste), también se realizó la evaluación comparativa de las capacidades de carga calculadas con los resultados de PDA para determinar la metodología que estime capacidades de carga axial por punta y fuste más cercanos a los resultados de PDA. En el capítulo 4, se analiza los motivos por los que la metodología elegida estima con mayor precisión la capacidad de carga de los pilotes en suelo analizado. Finalmente, en la sección de conclusiones y recomendaciones se muestran los resultados de la investigación y oportunidades de mejora para el desarrollo de próximas investigaciones en la misma área de esta.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Definición de pilotes

Los pilotes son elementos estructurales de madera, hormigón o acero que se utilizan para transmitir cargas superficiales a capas inferiores del suelo cuando las capas superficiales no son lo suficientemente capaces. Según Bowles (1997) los pilotes se usan comúnmente para los siguientes propósitos:

- Para llevar las cargas de la superestructura a través de un estrato de suelo.
- Para resistir las fuerzas de levantamiento o vuelco en casos donde la estructura este sometida a cargas laterales como el viento.
- Para compactar depósitos de suelo suelto y sin cohesión.
- Para controlar los asentamientos cuando las zapatas aisladas se encuentran apoyadas en un suelo altamente compresible.
- Como un factor de seguridad adicional debajo de los estribos o pilares de un puente. Particularmente si la erosión es un problema potencial.

Los pilotes son instalados en el suelo a través de una serie de métodos:

- Por hincado mediante una constante sucesión de golpes en la parte superior del pilote con un martillo. Esto produce un ruido considerable y vibraciones locales, que pueden ser desautorizadas por las municipalidades locales.
- Por hincado utilizando un dispositivo vibratorio conectado a la parte superior del pilote. Este método generalmente es relativamente silencioso y las vibraciones de conducción pueden no ser excesivas.
- Perforando un agujero e insertando el pilote en él, comúnmente, se llena la cavidad con concreto. Existe varios métodos para esta técnica de instalación de pilotes.

Das (2012) indica que los pilotes se pueden dividir en dos categorías con base en la naturaleza de su colocación: pilotes con desplazamiento y pilotes sin desplazamiento. Los pilotes hincados son pilotes con desplazamiento, debido a que mueven lateralmente parte del suelo; de aquí que existe una tendencia para la densificación del suelo que los rodea. En contraste, los pilotes perforados son pilotes sin desplazamiento ya que su colocación ocasiona muy poco cambio en el estado de esfuerzo en el suelo.

2.2 Tipo de pilotes

2.2.1 Pilotes de concreto

Este tipo de pilotes es altamente utilizado y Bowles (1996) los clasifica como pilotes prefabricados y pilotes fabricados in situ, los que se describen a continuación.

2.2.1.1 Pilotes prefabricados

Los pilotes prefabricados se moldean de acuerdo a las longitudes especificadas y son transportados al lugar de trabajo. Pueden ser hechos con refuerzo ordinario o se pueden preesforzar. El refuerzo es proporcionado para resistir el momento de flexión generado en los pilotes durante su recolección y transporte y también para proporcionar una resistencia suficiente a las cargas verticales y las fuerzas de tensión desarrolladas en el hincado. Los pilotes pretensados se forman tensionando cables de acero de alta resistencia y moldeando el pilote de concreto alrededor del cable. Los pilotes de refuerzo ordinario tienen longitudes de 10 a 15 m y cargas habituales de 300 KN a 3000 KN. En el caso de pilotes pretensados, estos tienen longitudes de 10 a 45 m y cargas de 7500 KN a 8500 KN.

Ventajas y desventajas:

- Pueden ser sometidos a excavaciones difíciles.
- Resistentes a la corrosión.
- Se pueden combinar fácilmente con la superestructura de concreto.
- Difícil de manejar a menos que este pretensado.
- Alto costo inicial.
- Difíciles de transportar.
- Desplazamiento considerable.

2.2.1.2 Pilotes fabricados in situ

Estos pilotes se construyen haciendo un barreno y luego colándolo con concreto. En la actualidad en la construcción se utilizan varios tipos de pilotes de concreto fabricados in situ y la mayoría de ellos fueron patentados por sus fabricantes (Das, 2012). En la siguiente

Figura 1 se indica algunas de los tipos de pilotes fabricados in situ patentadas comúnmente disponibles.

Figura 1: Tipos de pilotes fabricados in situ. Adaptado de "Fundamentos de ingeniería de cimentaciones", por Das, 2012

Ventajas.

- Relativamente baratos.
- Pueden ser revisados antes de verter el concreto.

Desventajas.

- Difíciles de empalmar después de fraguado el concreto.
- Los tubos delgados son vulnerables durante el hincado.

2.2.2 Pilotes de acero

Estos pilotes por lo general son tubos de acero de sección H, los cuales se pueden hincar en el suelo con sus extremos abiertos o cerrados. Pueden utilizarse pilotes de sección I, sin embargo, se prefieren los de sección H debido a que sus espesores del ala y del alma son iguales (Das, 2007). Su longitud habitual es de 15 a 60 m y las cargas que usualmente soportan van de 300 KN a 1200 KN.

Ventajas y desventajas:

- Pueden soportar altos esfuerzos de excavación.
- Pueden penetrar capas de suelo duras como gravas muy densas.
- Alta capacidad de carga.
- Material costoso.
- Alto nivel de ruido durante el proceso de hincado.
- Están sujetos a corrosión.
- Los pilotes se pueden dañar o desviar respecto a su eje mientras son hincados.

2.2.3 Pilotes de madera

Se tratan de troncos de árboles que han sido tratados para que la madera será recta, resistente y sin defectos. En caso deban penetrar un suelo duro, en la punta del pilote debe colocarse una especie de zapata de metal que proteja la madera durante el hincado (Bowles, 1997). Los pilotes de madera no pueden soportar altos esfuerzos al momento de ser hincados, lo que limita la capacidad del pilote. Las longitudes de este tipo de pilotes van de 10 a 20 m

Ventajas y desventajas:

- Si están sumergidos en suelos saturados son resistentes a la descomposición.
- Bajo costo.
- Son de fácil manejo.
- Vulnerable a ser dañado durante el hincado.
- Difícil de remplazar cuando se rompe durante el hincado.

Baja capacidad de resistir esfuerzos.

2.3 Clasificación según su funcionamiento

2.3.1 Pilotes de aporte por punta

En caso los resultados de perforación del suelo revelen la presencia de roca o de un material rocoso dentro de una profundidad razonable, entonces los pilotes se pueden prologar hasta la superficie del estrato rocoso (Das, 2012). En tanto ocurra esto, la carga última del pilote dependerá totalmente de la capacidad de carga del estrato de suelo en el que se apoya el pilote. Entonces este tipo de pilotes se denominan pilotes por carga de punta y su longitud será fácil de determinar ya que dependerá de la profundidad necesaria hasta llegar al estrato de apoyo. Si el suelo de apoyo es un material duro, pero no rocoso, y se necesita aumentar la capacidad de carga del pilote se puede empotrar una cierta profundidad de 4 a 10 veces el diámetro dependiendo del material de empotramiento y de la capacidad de equipo disponible (Rodríguez, 2017). En la Figura 2 se presenta el esquema de los dos casos descritos de pilotes por carga.

Figura 2: Pilotes por carga de punta a) pilote apoyado; b) pilote empotrado. Adaptado de "Fundamentos de ingeniería de cimentaciones", por Das, 2012

2.3.2 Pilotes de aporte por fricción

Esta solución se utiliza cuando no se encuentra ningún estrato resistente en el que podrían apoyarse pilotes de punta, (Rodríguez, 2017) y la utilización de estos resultaría costoso. Los pilotes de fricción son los que transmiten la carga al suelo que los rodea y la mayoría de la resistencia se deriva de la fricción de la superficie (como se puede observar en la Figura 3).

La magnitud de la fricción lateral es función del área perimetral del pilote. Sin embargo, Das (2012) menciona que el término de *pilotes por fricción* es un nombre inapropiado para suelos arcillosos, ya que en este caso la resistencia también es causada por la adhesión. Además, menciona que la longitud de estos pilotes dependerá de la resistencia del suelo al corte, la carga aplicada y el tamaño del pilote.

Figura 3: Pilote por fricción. Adaptado de "Fundamentos de ingeniería de cimentaciones", por Das, 2012

2.3.3 Pilotes de combinación de punta y fricción

En este tipo de pilotes las características geotécnicas de los materiales competentes y débiles, hacen que la resistencia por punta y fricción se desarrolle. Cabe anotar, que no siempre estas dos componentes actúan de manera simultánea debido a que cada una se desarrolla para niveles de desplazamiento diferentes Londoño, 2001 (como se citó en Barreto 2011).

2.3.4 Análisis estático de transferencia de carga

En la Figura 4 se puede observar que cuando la carga sobre el pilote aumenta gradualmente, parte de esta carga es resistida por la fricción desarrollada en la interface suelo-pilote y la otra parte es resistida por la punta del pilote. Además, la investigación realizada por Mansur y Hunter (1970) (como se citó en Das 2000) demostró que la resistencia por fricción Q_s se desarrolla a un desplazamiento mucho menor del pilote comparado con la resistencia de punta Q_p .

Figura 4: Mecanismo de transferencia de carga y naturaleza de variación de la resistencia en el fuste. Adaptado de "Fundamentos de ingeniería de cimentaciones", por Das, 2012

La capacidad de carga última de los pilotes puede ser calculada por la siguiente ecuación.

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (1.1)$$

Donde:

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

Q_s = resistencia por fricción

2.4 Métodos para el cálculo de capacidad de carga

2.4.1 Método para el cálculo de capacidad de carga por punta (Q_p)

De manera similar a la ecuación general propuesta por Meyerhof (1963) para la determinación de la capacidad de carga última en cimentaciones superficiales sometidas a caras verticales, la capacidad de carga de la punta (Q_p) de un pilote se puede determinar con la siguiente expresión.

$$Q_p = A_p q_p \quad (1.2)$$

$$Q_p = A_p (c N_c s_c d_c + \eta q N_q s_q d_q + 0.5 \gamma B N_\gamma s_\gamma) \quad (1.3)$$

Donde:

A_p = Área de la sección del pilote

q_p	= Resistencia unitaria por punta
c	= Cohesión
q	= Esfuerzo vertical a la altura de la punta del pilote
B	= Ancho o diámetro del pilote
N_c, N_q y N_γ	= Factores de capacidad de carga
s_c, s_q y s_γ	= Factores de forma
d_c y d_q	= Factores de profundidad

Bowles (1976) indica que el factor de capacidad de carga para el ancho del pilote N_γ no es afectado por la profundidad, y sugiere tomar el valor de η igual a 1 (menos para Vesic). Además, recomienda las siguientes ecuaciones para determinar d_c y d_q .

$$d_c = 1 + 0.4 \tan^{-1} \left(\frac{L}{B} \right) \quad (1.3)$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \tan^{-1} \left(\frac{L}{B} \right) \quad (1.4)$$

Das (2012) simplifica la expresión 1.3 a la mostrada a continuación.

$$Q_p = A_p (c' N_c^* + q N_q^* + 0.5 \gamma' B N_\gamma^*) \quad (1.5)$$

Donde N_c^* , N_q^* y N_γ^* son los factores de capacidad de carga que ya incluyen los factores de forma y profundidad necesarios. Además, sugiere que debido a que el ancho B de un pilote es relativamente pequeño el tercer término de la ecuación 1.5 se puede omitir, por otro lado, reemplaza los términos c y q por c' y q' para denotar la cohesión y esfuerzo efectivos; entonces se tiene.

$$Q_p = A_p (c' N_c^* + q' N_q^*) \quad (1.6)$$

2.4.1.1 Método de Meyerhof (1963)

Para la expresión 1.6, Meyerhof (1976) sugiere las siguientes expresiones para los factores de capacidad de carga.

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 (45 + 0.5 \phi) \quad (1.7)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad (1.8)$$

Donde

ϕ = Ángulo de fricción interna del suelo.

Además, los factores de forma y profundidad que usa son los siguientes.

$$s_c = 1 + 0.2K_p \frac{B}{D} \text{ para cualquier } \phi \quad (1.9)$$

$$s_q = 1 + 0.1K_p \frac{B}{D} \text{ para } \phi > 10^\circ \quad (1.10)$$

$$s_q = 1 \text{ para } \phi = 0$$

$$K_p = \tan^2(45 + 0.5\phi) \quad (1.11)$$

Donde B y D son las dimensiones de la sección del pilote, y L es la longitud del pilote que es igual al desplante en una cimentación superficial. Meyerhof (1976) indica que la capacidad de carga por punta en arenas aumenta con la profundidad de empotramiento en el suelo de apoyo y alcanza un valor máximo a una profundidad de empotramiento crítica, a partir de la cual, la resistencia por punta permanecerá constante. Esto se puede visualizar en la Figura 5

Figura 5: Naturaleza de variación de la resistencia por punta en un suelo arenoso. Adaptado de "Fundamentos de ingeniería de cimentaciones", por Das, 2012

Para pilotes apoyados en arenas donde c' es igual a 0, la ecuación 1.6 se simplifica en:

$$Q_p = A_p(q'N_q^*) \quad (1.12)$$

Para pilotes apoyados en arcillas saturadas donde ϕ es igual a 0, la capacidad de carga por punta se puede determinar mediante la siguiente ecuación.

$$Q_p = A_p(c_u N_c^*) = 9c_u A_p \quad (1.13)$$

Donde

c_u = Cohesión no drenada del suelo de apoyo.

Con base en observaciones de campo, Meyerhof (1976) también sugirió que la resistencia de punta última q_p en un suelo granular homogéneo ($L = L_b$ (longitud de empotramiento)) se puede obtener a partir de números de penetración estándar como

$$q_p = 0.4p_a N_{60} \frac{L}{D} \leq 4p_a N_{60} \quad (1.14)$$

Donde:

N_{60} = Valor promedio del número de penetración estándar cerca de la punta del pilote (casi $10D$ arriba y $4D$ debajo de la punta del pilote)

p_a = Presión atmosférica (aproximadamente 100 kN/m² o 2000 lb/pie²)

2.4.1.2 Método de Vesic (1975)

Para estimar la capacidad de carga por punta Vesic propone correcciones a investigaciones anteriores, la primera es que Vesic (1975) consideró que la resistencia por punta no crece linealmente al largo del pilote, sino que sólo crece hasta una profundidad de diez veces el ancho cuando se trata de arenas sueltas y veinte veces el ancho si se tiene arenas densas para luego mantenerse constante el resto de la profundidad. (Londoño, 2001 extraído de Barreto, 2012). Por otro lado, consideró que la capacidad de carga por punta no está regida por el esfuerzo unitario vertical efectivo en la base del pilote (q'), sino por el esfuerzo normal medio ($\bar{\sigma}_o$).

Es así, que el autor en base a la hipótesis planteada plantea la siguiente ecuación para el cálculo de la capacidad de carga por punta (Bowles, 1997):

$$Q_p = A_p(cN'_c d_c s_c + \bar{\sigma}_o N'_q d_q s_q + 0.5\gamma' B N'_\gamma s_\gamma) \quad (1.15)$$

Considerar para esta ecuación $\bar{\sigma}_o = \frac{1+2K_o}{3} * q'$, donde K_o es el coeficiente de presión de tierra en reposo que es igual a $1 - \tan\phi'$.

Dónde:

$$N'_c = \frac{4}{3}(\ln I_{rr} + 1) + \frac{\pi}{2} + 1; \text{ para suelos en condición no drenada } (\phi = 0). \quad (1.16)$$

$$N'_c = (N'_q - 1)\cot\phi; \text{ para las demás condiciones de suelos.} \quad (1.17)$$

$$N'_q = \frac{3}{3-\sin\phi} e^{\left(\frac{\pi}{2}-\phi\right)\tan\phi} \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) I_{rr}^{\frac{4\sin\phi}{3+3\sin\phi}} \quad (1.18)$$

Tal que, el índice de rigidez reducido (I_{rr}) para el suelo se estima con la siguiente ecuación:

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1+I_r*\Delta} \quad (1.19)$$

Tal que:

$$I_r = \text{índice de rigidez} = \frac{E_s}{2(1+\mu_s)(c'+q'\tan\phi')} = \frac{G_s}{c'+q'\tan\phi'} \quad (1.20)$$

E_s = módulo de elasticidad del suelo

μ_s = relación de Poisson del suelo

G_s = módulo de cortante del suelo

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

Bowles (1997) expone que el valor de I_r para suelos arenosos con densidad relativa entre 50 a 80% está entre 75 y 150, y para suelos de Limo se encuentra entre 50 a 75. Finalmente, Barreto (2012) sostiene que para el factor N'_γ se debe utilizar la fórmula propuesta por Hansen.

$$N'_\gamma = 1.5(N'_q - 1)\tan\phi \quad (1.21)$$

Y para todo ángulo fricción (ϕ)

$$d_c = 1 + 0.4\tan^{-1}\left(\frac{L}{B}\right) \quad (1.22) \quad s_c = 1 + \frac{NqB}{N_cL} \quad (1.24)$$

$$d_q = 1 + 2\tan\phi(1 - \sin\phi)^2\tan^{-1}\left(\frac{L}{B}\right) \quad (1.23) \quad s_q = 1 + \left(\frac{B}{L}\right)\tan\phi \quad (1.25)$$

$$s_\gamma = 1 - 0.4\left(\frac{B}{L}\right) \quad (1.26)$$

Siendo B el ancho de la base del pilote y L el largo del pilote.

2.4.1.3 Método de Janbu (1976)

Janbu (1976) supone una superficie de falla en el suelo en la punta del pilote como se muestra en la Figura 6 para proponer las formas de estimar los factores de carga.

Tal que:

$$Q_p = A_p(cN'_c d_c s_c + \bar{\sigma}_o N'_q d_q s_q + 0.5\gamma' B N'_\gamma s_\gamma) \quad (1.27)$$

$$N'_q = (\tan\phi + \sqrt{1 + \tan^2\phi})^2 * e^{2\psi\tan\phi} \quad (1.28)$$

$$N'_c = (N'_q - 1)\cot\phi \quad (1.29)$$

$$N'_\gamma = 1.5(N'_q - 1)\tan\phi \quad (1.30)$$

$$d_c = 1 + 0.4\tan^{-1}\left(\frac{L}{B}\right) \quad (1.31) \quad d_q = 1 + 2\tan\phi(1 - \sin\phi)^2\tan^{-1}\left(\frac{L}{B}\right) \quad (1.32)$$

Figura 6:Ángulo de Falla de Hanbu. Adaptado de "Foundation Analysis and Design", por Bowles, 1996

Además, se debe considerar los factores de forma iguales a 1, y el valor de ψ varía desde 60° para suelos blandos a 105° en suelos densos de acuerdo con Bowles (1996).

El American Petroleum Institute (API, 1984) ha formulado recomendaciones en diseños de pilotes sobre la forma de diseñar parámetros para pilotes en arenas, limos, arenas limosas y gravas basados en la descripción de los suelos que van desde materiales débiles hasta muy densos. Esta publicación sugiere que el uso de N_q es aplicable desde un valor mínimo de 8 para arenas muy sueltas hasta 50 para gravas o arenas muy densas. El ángulo varía desde 60° en arcillas blandas a cerca de 105° en suelos arenosos densos (Bowles, 1996).

2.4.1.4 Método de Coyle y Castello (1981)

Coyle y Castello (1981) analizaron 24 pruebas de carga de campo a gran escala de pilotes hincados en arena. Con base en los resultados de las pruebas, ellos sugirieron que, en arena.

$$Q_p = A_p(q'N_q^*) \quad (1.33)$$

Donde

q' = Esfuerzo vertical efectivo en la punta del pilote

N_q^* = Factor de capacidad de carga

En la Figura 7 se muestra la variación de N_q^* con L/D y el ángulo de fricción del suelo ϕ' .

Figura 7: Variación de N_q^* con L/D . Adaptado de "Fundamentos de ingeniería de cimentaciones", por Das, 2012

2.4.2 Métodos para el cálculo de capacidad de carga por fricción (Q_s)

De acuerdo con Terzaghi (1978) la capacidad de carga por fricción o fuste se estima de la siguiente manera:

$$Q_s = \sum p * \Delta L * f \quad (1.34)$$

Donde:

p = perímetro de la sección del pilote

ΔL = longitud incremental del pilote donde el per

f = resistencia unitaria por fricción lateral

Por la teoría de resistencia al esfuerzo cortante de Mohr - Coulomb la resistencia por fricción unitaria tiene la forma de.

$$f = Ca + \sigma_N \tan \delta \quad (1.35)$$

Donde:

δ = ángulo de fricción suelo – pilote

σ_N = esfuerzo normal

Ca = coeficiente de adherencia

2.4.2.1 Capacidad de carga por fuste para suelos no cohesivos

Burland (1973) hace las siguientes consideraciones:

- El reacomodo del suelo adyacente al pilote instalado reduce el parámetro de cohesión de la ecuación de Mohr a cero.
- El esfuerzo efectivo actuante en la superficie del pilote después de la disipación del exceso de presión de poro generado por el desplazamiento de volumen es al menos igual al esfuerzo efectivo horizontal.

En base a estas consideraciones, Burland desarrolla la ecuación:

$$f = \beta q' \quad (1.36)$$

Donde:

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

K = coeficiente de empuje de tierra

q' = esfuerzo vertical efectivo a la profundidad en consideración

δ = ángulo de fricción suelo – pilote

Meyerhof indica que f crece con la profundidad hasta una longitud crítica L' , a partir la cual permanece constante, es decir:

$$\text{Para } Z = 0 \text{ a } L' \quad f = K q' \tan \delta \quad (1.37)$$

$$\text{Para } Z = L' \text{ a } L \quad f = f_{Z=L'}$$

Donde:

Meyerhof recomienda la utilización de las siguientes expresiones para determinar el valor del coeficiente de empuje de tierra.

$K = 1 - \sin \phi'$; para pilotes perforados o hincados con ayuda de chorros de agua

$K = 1 - \sin \phi'$ a $1.4(1 - \sin \phi')$; para pilotes hincados de bajo desplazamiento

$K = 1 - \sin \phi'$ a $1.8(1 - \sin \phi')$; para pilotes hincados de alto desplazamiento

Y para los valores del ángulo de fricción entre el suelo y el pilote, indica tomar valores que van de $0.5\phi'$ a $0.8\phi'$.

Burland recomienda tomar los siguientes valores.

$$\delta = \phi' - 5$$

$K = 0.5$ para arenas sueltas y

$K = 1$ para arenas densas

Mansur y Hunter en base a sus investigaciones recomiendan los siguientes valores:

Pilotes de perfil H $K = 1.4 - 1.9$

Pilotes tubulares de acero $K = 1.2 - 1.3$

Pilotes de concreto precolados $K = 1.45 - 1.6$

El American Petroleum Institute (API) recomienda:

Pilotes tubulares de acero $K = 0.8 - 1.0$

Pilotes de concreto precolados $K = 1.0$

Adicionalmente, Bowles (1996) recomienda la utilización de los valores de ángulo de fricción suelo – pilote que muestra la Figura 8.

Interface materials	Friction angle, δ , degrees†
Mass concrete or masonry on the following:	
Clean sound rock	35°
Clean gravel, gravel-sand mixtures, coarse sand	ϕ
Clean fine to medium sand, silty medium to coarse sand, silty or clayey gravel	ϕ
Clean fine sand, silty or clayey fine to medium sand	ϕ
Fine sandy silt, nonplastic silt	ϕ
Very stiff and hard residual or preconsolidated clay	ϕ
Medium stiff and stiff clay and silty clay	ϕ
Steel sheet piles against the following:	
Clean gravel, gravel-sand mixture, well-graded rock fill with spalls	22°
Clean sand, silty sand-gravel mixture, single-size hard rock fill	17
Silty sand, gravel, or sand mixed with silt or clay	14
Fine sandy silt, nonplastic silt	11
Formed concrete or concrete sheetpiling against the following:	
Clean gravel, gravel-sand mixtures, well-graded rock fill with spalls	22–26
Clean sand, silty sand-gravel mixture, single-size hard rock fill	17–22
Silty sand, gravel, or sand mixed with silt or clay	17
Fine sandy silt, nonplastic silt	14
Various structural materials	
Masonry on masonry, igneous and metamorphic rocks:	
Dressed soft rock on dressed soft rock	35°
Dressed hard rock on dressed soft rock	33
Dressed hard rock on dressed hard rock	29
Masonry on wood (cross grain)	26
Steel on steel at sheet-pile interlocks	17
Wood on soil	14–16‡

Figura 8: Tabla de ángulo de fricción entre varios materiales y distintos tipos de suelo. Adaptado de "Foundation analysis and design", por Bowles, 1996

2.4.2.2 Capacidad de carga por fuste para suelos cohesivos

2.4.2.2.1 Método α

Este método fue propuesto por Tomilson (1971) y estima la resistencia por fricción lateral unitaria mediante la siguiente ecuación:

$$f = \alpha C_u \quad (1.38)$$

Donde:

f = resistencia por fricción lateral unitaria

α = factor empírico de adhesión

C_u = resistencia al corte no drenado del suelo

Así mismo, Bowles (1997) sugiere que los valores del factor empírico de adhesión se pueden considerar como se muestra en la Tabla 1 (Londoño, 2001):

Tabla 1: Factores de adherencia

Condiciones del suelo	Factor de Adherencia (α)
Arenas o gravas arenosas por encima de un suelo cohesivo rígido	1.25
Arcillas blandas o limos sobre un suelo cohesivo rígido	0.40
Suelo Cohesivo rígido	0.40

Nota: valores obtenidos mediante ensayos geotécnicos a los suelos estudiados. Adaptado de “Aporte a los sistemas de pilotes, nuevos métodos de análisis y evaluación de aspectos constructivos”, por Londoño, 2001.

Por lo tanto, la resistencia lateral última se calculará de la siguiente manera.

$$Q_s = \sum f * A_p * \Delta L \quad (1.39)$$

Asimismo, Barreto (2011) indica que el factor α se puede estimar con la siguiente Figura 9.

Figura 9: Abaco de factor de adherencia Barreto. Adaptado de "Evaluación comparativa de la capacidad de carga de cimentaciones profundas. Fórmulas analíticas y ensayos de carga", por Barreto, 2011

2.4.2.2.2 Método β

Para el caso de arcillas saturadas la resistencia por fricción unitaria f para el pilote se puede determinar con base en los parámetros del esfuerzo efectivo de la arcilla en un estado remodelado. Para este caso.

$$f = \beta \sigma'_0 \quad (1.40)$$

Donde

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

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

K = coeficiente de presión de tierra

En Das (2012) se sugieren las siguientes expresiones para determinar K

$K = 1 - \sin \phi'_R$, para arcillas normalmente consolidadas y

$K = (1 - \sin \phi'_R) \sqrt{OCR}$ para arcillas sobreconsolidadas, donde OCR es la relación de sobre consolidación.

2.4.2.2.3 Método γ

Este método fue propuesto por Vijayvergiya y Focht (1972) y se basa en la hipótesis de que el desplazamiento del suelo ocasionado por el hincado del pilote resulta en una presión lateral pasiva a cualquier profundidad. Das (2006) indica que la resistencia por fricción lateral unitaria promedio es:

$$f_{prom} = \lambda(\bar{\sigma}'_o + 2C_u) \quad (1.41)$$

Donde:

$\bar{\sigma}'_o$ = esfuerzo vertical efectivo medio para toda la longitud de empotramiento

C_u = resistencia cortante no drenada media ($\phi = 0$)

Barreto (2013) sostiene que esta consideración es importante, pues en la mayoría de situaciones donde se requiere instalar pilotes es usual encontrar terrenos heterogéneos.

Así mismo, Das (2007) indica que se debe ser cuidadosos cuando se obtenga los valores de $\bar{\sigma}'_o$ y C_u en un suelo con diferentes estratos. Siendo que el procedimiento correcto para el cálculo sería el de estimar los valores mediante promedios ponderados de acuerdo con la profundidad individual de cada estrato. Tal como se explica en la Figura 10, que fue tomada del estudio indicado. Esta imagen describe un pilote que fue hincado a través de tres estratos de arcilla con diferentes C_u . De tal manera que el cálculo de $\bar{\sigma}'_o$ y C_u será de la siguiente forma.

$$\bar{C}_u = \frac{C_u(1)+C_u(2)+C_u(3)}{L} \quad (1.42)$$

$$\bar{\sigma}'_o = \frac{A_1+A_2+A_3}{L} \quad (1.43)$$

Figura 10: Esquema de esfuerzo vertical efectivo medio para un pilote hincado. Adaptado de "Fundamentos de ingeniería de cimentaciones", por Das, 2012

2.5 Prueba de carga dinámica

La prueba de carga dinámica es un método que se utiliza para determinar la capacidad de carga de cimentaciones profundas. Esta prueba consiste medir las deformaciones y aceleraciones que se producen en la cabeza del pilote durante el proceso de hincar o rehincado. Para que luego, con el uso de la teoría de ondas puedan ser procesados y utilizados para desarrollar capacidad de carga.

Cheney y Chassie (1993, como lo citó Caicedo, 2010) sostienen en su investigación que la ventaja principal de las pruebas de carga dinámica es la rapidez con la que se realiza el ensayo y el ahorro que esto conlleva. Además, se menciona que esta prueba posee ventajas adicionales respecto a la capacidad de evaluación y monitorización de los resultados, como se listan a continuación.

Ventajas de la prueba de carga dinámica:

- Cálculos de la capacidad de carga del pilote a lo largo de la profundidad de penetración.
- Proporciona distribución de resistencias del suelo.
- Permite calcular la energía y desempeño del sistema de hincar a diferentes condiciones de presión e inclinación.
- Permite diferenciar si el causante de cambios en la resistencia del hincado es el sistema de hincado o los estratos de cimentación.
- Cálculo de esfuerzos de compresión y tensión que desarrolla el pilote durante la hincar.

Permite conocer el estado de la integridad del pilote durante la hincar.

2.5.1 Equipo utilizado para las pruebas de carga dinámica

2.5.1.1 Sensores de deformación y aceleración

Los sensores que se utilizan para realizar las pruebas de carga dinámicas constan de dos deformímetros y dos acelerómetros colocados en extremos opuestos de la cabeza del pilote, siendo los primeros utilizados para calcular la fuerza multiplicando la deformación ϵ multiplicado por el módulo de elasticidad E y el área. La velocidad se obtiene integrando la aceleración, para garantizar una correcta instrumentación es necesario que estos sensores estén colocados a una longitud entre 1 a 2 veces el diámetro del pilote del punto de aplicación de la carga, para garantizar la estabilización de las ondas de compresión cuando pasen por los sensores. A continuación, la Figura 11 y Figura 12 muestran la forma e instalación de los sensores.

Figura 11: Sensores acelerómetros y deformímetros. Adaptado de Pile Dynamic Inc.

Figura 12: Sensores instalados en cabeza del pilote de acero. Adaptado de Pile Dynamic Inc.

2.5.1.2 Analizador de hincado PDA

El PDA se encarga de monitorear la salida de datos de los sensores cuando al pilote se le está aplicando la carga dinámica. Información que evalúa de la siguiente manera:

- La información de deformación, combinado con el Módulo de Elasticidad y la Sección Transversal del pilote, da la fuerza axial en el pilote.
- La información de los acelerómetros integrado en función del tiempo produce la velocidad diferencial de la onda que viaja a través del pilote.
- La información de la aceleración mediante el integrado doble en función del tiempo produce el asentamiento del pilote por golpe.

Y de esta información, el PDA calcula la capacidad de carga axial del pilote mediante la utilización del método CASE mostrando los resultados de forma directa. A continuación, la Figura 13 muestra una imagen del equipo analizador de hincado de pilotes.

Figura 13: Analizado de instalación de pilotes. Adaptado de Pile Dynamic Inc.

2.5.2 Método CASE

Como lo indica Lara (2014), cuando se realiza el ensayo de prueba de carga dinámica, los equipos utilizados realizan un tratamiento de datos aplicando el método CASE. Método que es conocido comúnmente como Ensayo Dinámico de Pilotes, se basa en unos análisis de fuerzas dinámicas y aceleraciones medidos en el campo mientras que el pilote está siendo hincado. Este método es una técnica analítica para determinar la Capacidad de carga del Pilote desde una data de Rastreo de Onda.

El cálculo de este método incluye un factor de correlación empírica, j_c , que puede ser determinado por un ensayo de carga de un pilote en el lugar. Sin embargo, es además posible usar el Método Case sin un ensayo de carga de pilote usando valores de otro suelo similar.

2.5.3 Propagación de onda del método CASE

Lara (2014) indica en su trabajo que al golpear la cabeza del pilote con un martillo o peso se genera una onda en compresión que viaja por todo el pilote. Durante el recorrido de la onda por el pilote, el pulso induce una velocidad descendente que se considera positiva. Si el pilote funciona solo por punta (sin fricción lateral), el pulso no se refleja en la parte inferior y viaja de regreso hacia arriba como otra onda produciendo un movimiento ascendente que se considera negativo.

El tiempo requerido para que una onda viaje desde la parte inferior y a la superior es $2D_2/c$, donde:

D_2 = Distancia desde los sensores y acelerómetros a la cumbre del pilote.

C = Velocidad de la onda del pilote

Figura 14: Curvas de fuerza y velocidad vs tiempo para un pilote con mayor resistencia por punta. Adaptado de Lara, 2014

Figura 15: Curvas de fuerza y velocidad vs tiempo para un pilote con mayor resistencia por fuste. Adaptado de Lara, 2014

El tiempo $2D_2/c$ es mucho menor que el tiempo entre golpes de martillo. Por lo que, el PDA puede monitorear incluso los efectos de un solo golpe. La gráfica de fuerza vs velocidad de un pilote de carga por aporte mayormente por punta (como es medido y representado por el PDA) son similares a los de la Figura 14, estos gráficos son llamados Rastreo de Ondas. En el caso de otro pilote que no tiene resistencia por fricción lateral y mucho menos capacidad de carga por punta que el mostrado. Su comportamiento muestra más de la energía en el movimiento descendente de la onda, donde este es gastado en avance del pilote, por lo que la onda reflejada tiene menos fuerza y menor velocidad.

Finalmente, considerando un pilote por fricción con muy pequeña resistencia por punta, como el pulso de la onda a compresión viaja hasta abajo del pilote, encuentra resistencia por la fricción lateral, entonces la del rastreo de onda medida cerca del tope sería similar a la Figura 15. La escala de tiempo correspondiente a la profundidad debajo del instrumento, y la distancia vertical entre las líneas de fuerza y velocidad refleja la resistencia del suelo en varias profundidades. El Rastreo de Onda además provee información acerca de la integridad del pilote. Por ejemplo, si el pilote se rompe durante el hincado, la fractura produce una onda reflejada que cambia el rastreo de onda grabada por el PDA.

2.5.4 Análisis CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program)

El Método CASE es una simplificación de la real dinámica del hincado de pilotes. Se obtiene un factor J_c de manera empírica que calibra el análisis, por lo que el resultado final no es mejor que el valor determinado por la habilidad del ingeniero a cargo (Rausche, Moses y Goble (1972, obtenido de Lara, 2014). Sin embargo, Lara (2014) comenta en su trabajo que

un análisis por medio de la ecuación de la onda utiliza un modelo numérico mucho más preciso, pero sufre de estimaciones menos precisas de la energía transmitida por el martillo. Afortunadamente, las fortalezas y las debilidades de estos métodos son complementarios, por lo que se pueden combinar para mejorar el análisis. Este análisis combinado es conocido como CAPWAP ó Programa de Análisis Case de Ondas en Pilotes. Finalmente, el modelo numérico usado en CAPWAP es esencialmente el mismo que el de la ecuación de la onda excepto que el martillo y accesorios son removidos y reemplazado con data de Fuerza vs Tiempo y Velocidad vs Tiempo. Por comportamiento de cada iteración, el análisis produce valores de R_u (resistencia última en el suelo), q (el desplazamiento dinámico, quake), y J_c (factor de amortiguamiento del suelo para el método CASE).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Material

3.1.1 Población

La población sujeta a estudio estuvo constituida por pilotes tubulares de acero hincados en suelo costero del puerto del Callao, en la provincia del Callao.

3.1.2 Muestra

El tamaño de la muestra que se utilizó para el presente estudio abarca a 2 pilotes tubulares de acero que fueron hincados en suelo costero del puerto del Callao, en la provincia del Callao; y que fueron sometidos a ensayos de pruebas de carga dinámica (PDA).

3.1.3 Método

3.1.3.1 Nivel de investigación

Este trabajo comprende aspectos de los niveles de investigación exploratorio y correlacional. Exploratorio debido a que a partir de una revisión literaria se encontró carencias en el cálculo de capacidad de carga para cimentaciones profundas en suelos peruanos. Esto se explicó en la realidad problemática. Además, esta investigación pretende servir a otras que realicen un análisis similar, pero en otros tipos de suelo y para diferentes pilotes. ya que las conclusiones de esta investigación serán aplicables al suelo analizado. Y correlacional porque este trabajo tiene como finalidad relacionar las variables de estudio y conocer el grado de aproximación numérica entre estas.

3.1.3.2 Diseño de investigación

El diseño de la investigación consistió en el análisis de 2 pilotes, de los ensayos de carga dinámica (PDA) y los respectivos perfiles estratigráficos del suelo de cimentación donde los pilotes fueron instalados. Tal que, de acuerdo a la información recolectada se realizaron los cálculos de la capacidad de carga teórica utilizando las metodologías analíticas descritas en el marco teórico y se procedió a compararlos con los valores de capacidad de carga real que se obtuvieron de los informes de ensayo PDA, para determinar las metodologías que estimen valores más cercanos a los resultados de estos últimos.

3.1.4 Variable de estudio y operacionalización

Las variables utilizadas en la presente investigación se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Tabla de variables de investigación

Variable	Definición conceptual o consuntiva	Definición operacional
Capacidad de carga ultima por fuste (KN)	Resistencia al esfuerzo cortante que se desarrolla a lo largo del fuste del pilote a partir de un desplazamiento	Estas capacidades se estiman mediante la metodología analítica. Los cálculos se realizan a partir de parámetros geotécnicos obtenidos de los informes de estudio del suelo analizado.
Capacidad de carga ultima por punta (KN)	Resistencia al esfuerzo cortante que se desarrolla en el estrato de suelo donde se apoya la punta del pilote a partir de un desplazamiento	
Capacidad de carga por ensayos PDA (KN)	Resistencias por punta y fuste obtenidas de pruebas de carga dinámica realizadas en los pilotes instalados. Para esta investigación estas capacidades de carga serán consideradas como reales	Estas capacidades de carga se obtienen de los informes de las pruebas dinámicas realizadas en los pilotes utilizados en esta investigación

3.1.5 Técnica e instrumentación de recolección de datos

- **Estudios geotécnicos e informes de pruebas de caga dinámica de los pilotes estudiados**

Son los estudios geotécnicos e informes de pruebas dinámicas para los 2 pilotes analizados, recolectados de una empresa especializada en instalación de pilotes. Estos estudios contienen todos los datos de los parámetros resistentes que se necesitaron para estimar la capacidad de carga teórico. Y permitieron conocer la constitución de los estratos donde los pilotes fueron instalados. Parte de la información recolectada se puede visualizar en los anexos 6 al 10.

3.1.6 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

- **Metodologías de cálculo analíticas**

Son las metodologías que fueron descritas en el marco teórico de la presente tesis. Estas permitirán determinar la capacidad de carga teórica para la punta y fuste del pilote.

- **Hojas de cálculo desarrolladas en Excel**

Se utilizó el software Excel por su sencillez al momento de modelar los métodos de cálculo de capacidad de carga. Esto nos permitió obtener la capacidad de carga por fuste y punta, y determinar las relaciones de proximidad entre las capacidades de carga real y las teóricas. Estas hojas de cálculo se encuentran en los anexos.

- **Gráficos y tablas comparativas entre capacidades reales vs teóricas**

Se utilizo tablas para visualizar de manera resumida los resultados de los cálculos realizados. y gráficos de barras para mostrar la diferencia que existe entre las capacidades teóricas y reales.

3.1.7 Información utilizada

En este parte se describe la información que fue recopilada de informes brindados por una empresa acreditada en el mercado laboral, la cual contiene perfiles estratigráficos, parámetros geotécnicos del suelo y resultados de ensayos de pruebas de carga dinámica. Sin embargo, es válido aclarar que el origen y/o fuente de la información mencionada será tratada de manera confidencial, respetando el acuerdo pactado entre la empresa y autores de la tesis, por lo que no se mencionará el nombre del proyecto, ubicación exacta de los

elementos de cimentación ni nombre de los encargados o responsables de estos. Para la presente investigación se contó con 2 pilotes analizados. Cada pilote contaba con la siguiente información: pruebas de carga dinámicas (PDA), parámetros geotécnicos que incluyen datos como la descripción del estrato, clasificación del suelo utilizando el estándar SUCS, profundidad de estratos, pesos específicos, esfuerzos efectivos y resultados de ensayos de penetración estándar SPT; dejando en evidencia la falta de parámetros para una descripción y análisis más riguroso de la interacción suelo y pilote. Por lo que, los datos faltantes han sido estimados utilizando fórmulas empíricas y rangos de valores para suelos de similar descripción a los estudiados.

A continuación, se describirán y destacarán las particularidades para cada elemento de cimentación con la finalidad de que esta investigación sirva como antecedentes para futuros trabajos de la misma área.

3.1.7.1 Pilote P-1

El pilote P1, es un elemento de cimentación profunda de acero tubular (esfuerzo de fluencia de 414 MPa) que posee un diámetro de 812.8 mm y un espesor de pared de 18 mm. La longitud inicial del pilote P1 fue de 24 m, sin embargo, posteriormente fue unido a otro elemento de acero con similares características para lograr una longitud total de 43.87 m. La penetración del pilote al final de hincado fue de 39.12 m y el perfil estratigráfico que define las condiciones más aproximadas de hincado se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3: Perfil estratigráfico del pilote P-1

Perfil	SUCS	profundidad (m)		γ (KN/m ³)	γ' (KN/m ³)	σ' (KPa)	N60	W %	ϕ'
Arena fina mal graduada, medianamente densa, saturada, marrón claro	SP	0	1.5	20.1	10.3	7.6	12		30.62
Arena fina mal graduada, suelta, húmeda, marrón claro	SP	1.5	6.5	19.8	10.0	32.1	8		29.47
Arena fina mal graduada, medianamente densa, saturada, marrón claro	SP	6.5	9	20.2	10.4	44.8	15		31.48
Limo de baja plasticidad, medianamente	ML	9	13	18.3	8.5	61.4	5	30	28.59

compacto, saturado, plomo oscuro									
Limo de baja plasticidad, muy compacto, saturado, plomo oscuro	ML	13	16.5	18.6	8.8	76.5	19	36.5	32.61
Limo de baja plasticidad, medianamente compacto, saturado, plomo oscuro	ML	16.5	18	18.2	8.4	82.6	4	34.1	28.29
Limo de baja plasticidad, medianamente compacto, saturado, plomo oscuro	ML	18	23	17.9	8.1	102.4	8	33.90	29.47
Grava arenosa, mal graduada, densa, saturada, plomo	GP	23	39.12	25.2	15.4	224.9	-		40.75

En los estratos superficiales se puede apreciar la presencia de arenas finas con clasificación SP, sueltas y medianamente densas con valores de N entre 8 y 15. A partir de una profundidad de 9 m se puede apreciar la presencia de estratos de limos de baja plasticidad medianamente compactos y muy compactos los cuales tiene una clasificación de ML del SUCS, este tipo de suelo sigue hasta una profundidad de 23 m. Subyacente a estos estratos se encuentra la presencia de grava muy densa perteneciente a la formación de Lima que corresponde a la clasificación GP. A continuación, la Figura 16 muestra el modelo geotécnico del pilote P-1.

Figura 16: Modelo geotécnico del pilote P-1. Fuente propia.

Por otro lado, el ensayo dinámico consistió en el monitoreo del hincado inicial y el rehincado del pilote con el equipo PDA, y el análisis de los datos registrados durante el hincado. Los sensores de aceleración y deformación fueron colocados 3 m debajo de la cabeza del pilote. El pilote fue hincado usando un martillo hidráulico Junttan HHK 14S. Este martillo tiene un pistón de 137KN de peso y energía máxima de 206 KN-m, que corresponde a una altura de caída máxima de 1.5 m. este pilote fue hincado utilizando una altura de caída máxima de 1.20 m. Durante el ensayo PDA del hincado inicial se registró con el PDA un total de 960 golpes.

El hincado comenzó con golpes de 0.20 m de altura de caída, la cual fue incrementando escalonadamente hasta una altura máxima de caída de 1.20 m. los últimos 8 golpes fueron aplicados con una altura de caída 1.20 m. la penetración del pilote fue medida topográficamente y alcanzo una penetración total de 0.15 m en los últimos 8 golpes. En base a estos datos, el set (penetración por golpe) correspondiente al final del hincado es de 18.8 mm o 13 golpes/0.25 m. El rehincado se realizó 74 horas después del hincado inicial. Durante el rehincado se registró con el PDA un total de 127 golpes aplicados en siete series, con altura de caída de 1.20 m. La primera serie consistió en 10 golpes con penetración de 60 mm (set = 6 mm/golpe). La segunda serie consistió en 10 golpes con penetración de 78 mm (set= 7.8 mm/golpe). La tercera serie consistió en 21 golpes con penetración de 163 mm (set= 7.8

mm/golpe). La cuarta serie consistió en 26 golpes con penetración de 250 mm (set= 9.6 mm/golpe). La quinta serie consistió en 25 golpes con penetración de 250 mm (set= 10 mm/golpe). La sexta serie consistió en 9 golpes con penetración de 65 mm (set= 7.2 mm/golpe) y la segunda séptima consistió de 26 golpes con penetración de 250 mm (set= 9.6 mm/golpe). El análisis CAPWAP para un golpe al inicio del rehincado indica un resultado de capacidad estática total de 5890 KN, correspondiendo 5255 KN a la resistencia por fricción lateral y 635 KN a la resistencia por punta, tal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Resultados de prueba de carga dinámica al pilote P-1

Set (mm)	Altura de caída (m)	Penetración para el golpe analizado (m)	CAPWAP		
			Capacidad por fuste (KN)	Capacidad por punta (KN)	Capacidad total (KN)
6.0	1.2	38.3	5255	635	5890

3.1.7.2 Pilote P-2

El pilote P2, de igual manera, es un elemento de cimentación profunda de acero tubular que posee un diámetro de 812.8 mm y un espesor de pared de 18 mm. El esfuerzo de fluencia del acero de los pilotes fue de 414 MPa. La longitud inicial del pilote P2 fue de 24 m, sin embargo, posteriormente fue unido a otro elemento de acero con similares características para lograr una longitud total de 45.14 m. La penetración del pilote al final de hincado fue de 40.25 m y el perfil estratigráfico que define las condiciones más aproximadas de hincado se presenta en la Tabla 5 y su continuación en la Tabla 6.

Tabla 5: Perfil estratigráfico del pilote P-2

Perfil	SUCS	profundidad (m)		γ (KN/m ³)	N60	ϕ'
Arena fina mal graduada, suelta, húmeda, marrón claro	SP	0	2	20.1	7	29.17
Arena fina mal graduada, medianamente densa, saturada, marrón claro	SP	2	4.45	20.5	11	30.33

Arena limosa, mal graduada, medianamente densa, saturada marrón claro	SM	4.45	8	19.1	14	31.19
Arena limosa, mal graduada, muy suelta, saturada, color plomo. Finos orgánicos	SM	8	10	18.7	1	27.40
Arena limosa, mal graduada, medianamente densa, saturada marrón claro	SM	10	12	19.2	14	31.19

Tabla 6: Perfil estratigráfico el pilote P-2 (continuación de la Tabla 13)

Perfil	SUCS	profundidad (m)		γ (KN/m ³)	N60	ϕ'
Limo arenoso, ligeramente orgánico, de baja plasticidad, medianamente compacto, suelto, saturado, marrón claro	ML	12	14	18.3	3	28.00
Limo ligeramente orgánico, de baja plasticidad, medianamente compacto, saturado, plomo oscuro	ML	14	16	18.2	13	30.91
Limo de mediana plasticidad, blando, saturado, plomo oscuro	MH	16	19	14.9	2	27.70

Limo de baja plasticidad, medianamente compacto, saturado, plomo oscuro	ML	19	21	15.5	5	28.59
Limo de baja plasticidad, muy compacto, saturado, plomo oscuro	ML	21	22	15.8	17	32.04
Grava arenosa, mal graduada, densa, saturada, plomo	GP	22	40.25	25.2	-	40.75

Se puede apreciar la presencia de arenas finas y arenas limosas con clasificación SP y SM, sueltas a muy sueltas con valores de N entre 1 y 14. A partir de una profundidad de 12 m se puede apreciar la presencia de estratos de limos de baja a mediana plasticidad, blandos y medianamente compactos, los cuales tiene una clasificación de ML y MH del SUCS. Subyacente a estos estratos se encuentra la presencia de grava muy densa perteneciente a la formación de Lima que corresponde a la clasificación GP. A continuación, la Figura 17 muestra el modelo geotécnico del pilote P2.

Figura 17: Modelo geotécnico del pilote P-2. Fuente propia

El ensayo dinámico para este pilote consistió del monitoreo del hincado inicial y el rehincado del pilote con el equipo PDA, y el análisis de los datos registrados durante el hincado. Los sensores de aceleración y deformación fueron colocados 3 m debajo de la cabeza del pilote. El pilote fue hincado usando un martillo hidráulico Junttan HHK 14S. Este martillo tiene un pistón de 137KN de peso y energía máxima de 206 KN-m, que corresponde a una altura de caída máxima de 1.5 m. este pilote fue hincado utilizando una altura de caída máxima de 1.20 m. Durante el ensayo PDA del hincado inicial se registró con el PDA un total de 1258 golpes. El hincado comenzó con golpes de 0.10 m de altura de caída, la cual fue incrementando escalonadamente hasta una altura máxima de caída de 1.20 m. los últimos 6 golpes fueron aplicados con una altura de caída 1.20 m. La penetración del pilote fue medida topográficamente y alcanzo una penetración total de 0.10 m en los últimos 6 golpes. En base a estos datos, el set (penetración por golpe) correspondiente al final del hincado es de 16.7 mm o 15 golpes/0.25 m. El rehincado se realizó 169 horas después del hincado inicial. Durante el rehincado se registró con el PDA un total de 25 golpes aplicados en dos series, con altura de caída de 1.20 m. la primera serie consistió de 10 golpes con penetración de 36

mm (set = 3.6 mm/golpe). La segunda serie consistió de 15 golpes con penetración de 78 mm (set= 5.2 mm/golpe). El análisis CAPWAP para un golpe al inicio del rehincado indica un resultado de capacidad estática total de 6570 KN, correspondiendo 5695 KN a la resistencia por fricción lateral y 875 KN a la resistencia por punta como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7: Resultados de las pruebas de carga dinámica del pilote P-2

Set (mm)	Altura de caída (m)	Penetración para el golpe analizado (m)	CAPWAP		
			Capacidad por fuste (KN)	Capacidad por punta (KN)	Capacidad total (KN)
3.6	1.2	38.3	5695	875	6570

4 RESULTADOS

4.1 Cálculo de la capacidad de carga

4.1.1 Cálculo de la capacidad de carga por punta

Para el procedimiento de cálculo de la capacidad de carga por punta se utilizó los métodos analíticos descritos en el capítulo 1 y la información geotécnica y capacidad de carga obtenida de los PDA que se comentó en el capítulo 2. A continuación, se listan las consideraciones que se tomaron en cuenta para el cálculo de la resistencia por punta. La hoja de cálculo de carga para punta se puede ver en los Anexos 3 y 4.

- No se ha analizado el efecto que puede tener la gran longitud de los pilotes de acero, mayores a 40 m, dentro de las consideraciones que plantearon los autores para sus factores de corrección. Por ejemplo, para los factores de corrección por forma y profundidad donde prevalece el cociente entre ancho del pilote y longitud del mismo (B/L), siendo el L un valor por lo general 40 veces mayor al B para el presente estudio.
- Para poder estimar la capacidad de carga axial en la punta de los pilotes se necesitaba contar con valores de ángulo de fricción del estrato gravoso, por lo tanto, se ha utilizado el método de Peck basados en correlaciones de N_{60} con el ángulo de fricción para suelos arenosos.
- El método de Coyle y Castello (1981) fue desarrollado para suelos arenosos, sin embargo, se tomó en cuenta los resultados de capacidad por punta debido a que a lo largo

de los estratos de fundación existe suelo arenoso e incluso en el estrato donde se apoya el pilote.

- Para el cálculo de la capacidad de carga axial por Vesic (1975), se necesitaba contar con los valores del coeficiente de presión de tierra en reposo (K_0) y el Índice de rigidez reducido (I_{rr}). Para el primero se utilizó las fórmulas dadas por Bowles (1997) que dependen del ángulo de fricción efectivo mientras que, para el cálculo del I_{rr} se procedió de acuerdo a Das (2011) utilizando un valor del factor “m”, necesario para el cálculo del módulo de elasticidad del suelo (E_s), correspondiente a suelo gravoso denso.
- Si bien los pilotes de acero tubulares son diseñados bajo la idea de que trabajarán principalmente por fuste debido a la dificultad para determinar si se formará un tapón en la base del pilote; en el presente trabajo se estimará este valor ya que la prueba de PDA arroja valores de resistencia en punta para el presente estrato.
- Respecto al área de la sección transversal utilizada para calcular la capacidad de carga por punta, se consideró en un primer caso la formación de tapón, es decir, como si los pilotes analizados sean de sección circular no hueca. Y para un segundo caso, se tomó el área de contacto real que tiene la sección transversal de acero tubular con el suelo gravoso en su base.

Por lo tanto, los resultados de capacidad de carga por punta para las consideraciones planteadas se muestran en la Tabla 8 y Tabla 9, tal que los resultados de las capacidades de carga pueden revisarse en la sección de anexos.

Tabla 8: Resultados de capacidad de carga por punta considerando formación de tapón (KN)

Pilote	Terzaghi	Vesic	Meyerhof	Hansen	Janbu	C & C
P1	10774.62	43627.35	11007.26	11050.31	6805.49	18978.42
P2	11098.71	53971.86	11331.92	11375.23	7008	19242.86

Tabla 9: Resultados de capacidad de carga por punta sin considerar tapón (KN)

Pilote	Terzaghi	Vesic	Meyerhof	Hansen	Janbu	C & C
P1	1017.51	4120	1039.48	1043.55	642.68	1792.25
P2	1048.12	5096.9	1070.14	1074.23	661.81	1817.22

4.1.2 Cálculo de la capacidad de carga por fuste

La capacidad de carga por fuste mediante métodos analíticos fue calculada a partir de la información geotécnica relacionada a cada pilote hincado y que fue presentada anteriormente. En los anexos se puede visualizar la hoja de cálculo para cada pilote. A continuación, se mencionan las siguientes consideraciones respecto al cálculo del fuste.

- Los estratos de suelo que rodean a los pilotes estudiados hincados en El Puerto del Callao son predominantemente arena, arena limosa y grava. Por lo que la resistencia por fuste está representada, principalmente, por la fricción suelo - pilote y la cohesión es despreciable (ya que los suelos son no cohesivos). Entonces, no se aplicó los métodos analíticos α y λ , ya que estos métodos analíticos son aplicables a suelos cohesivos según las recomendaciones de sus autores.
- El método analítico utilizado es el método β . El cual fue propuesto por Burland para suelos no cohesivos. Como se vio en el marco teórico este método se fundamenta en la teoría de esfuerzo cortante de Mohr- Coulomb. Y sugiere que la fricción está dada por la ecuación $f = \sigma_v K \tan \delta$. En base a sus investigaciones diversos autores recomiendan valores de coeficiente de presión lateral del suelo (K) y de ángulo de fricción entre suelo y pilote (δ). Para estimar la fricción se utilizó lo recomendado, para pilotes de acero tubulares, por los siguientes autores: Meyerhof, Mansur y Hunter, Burland y el API (American Petroleum Institute).
- Respecto al ángulo de fricción entre el suelo y el pilote (δ):
 - Para Meyerhof se recomienda tomar valores entre 0.5 y 0.8 del ángulo de fricción interna del suelo ϕ
 - Burland sugiere tomar valores de δ igual a al ángulo de fricción ϕ menos 5°
 - Para el caso del API y Mansur y Hunter, los autores sugieren tomar valores para δ , de acuerdo al material y tipo de pilote en contacto con un determinado tipo de suelo.
- Respecto al coeficiente de presión lateral del suelo (K):
 - Meyerhof indica tomar el factor K como una función de la presión lateral del suelo en reposo (K_0), que a su vez está en función del ángulo de fricción interna del suelo.
 - Burland recomienda tomar valores para K de 0.5 para arenas y 1 para arenas muy densas. Como los pilotes analizados están empotrados en un estrato de grava

arenosa, y este autor no especifica un valor de K para gravas, se tomó el valor de K que recomienda para arenas muy densas.

- Con base en resultados de pruebas en el campo, Mansur y Hunter recomiendan valores de K de acuerdo al tipo de pilote. En este caso se utilizó el valor de K que los autores recomiendan para pilotes tubulares de acero.
- El API también recomienda valores de K de acuerdo al tipo de pilote. Estos van de 0.8 a 1 para pilotes tubulares.
- En caso del método de Meyerhof, el autor sugiere que la fricción unitaria f aumenta en relación con la profundidad hasta una longitud crítica, a partir de la cual, la fricción permanece constante. Según el autor la longitud crítica va de 15 a 20 veces el diámetro. La longitud crítica utilizada en el cálculo es de 12 m para todos los pilotes, puesto que tienen el mismo diámetro.
- No se utilizó Coyle y Castello debido a que la estimación del coeficiente de presión lateral K , según estos autores, es a partir de un ábaco que utiliza como ingreso la relación entre la longitud del pilote y su diámetro. Entonces debido a que las relaciones entre la longitud y el diámetro de los pilotes analizados sobrepasan los valores encontrados por este autor no se aplicó este método.

Los resultados para capacidad de carga por fuste obtenidos para cada pilote analizado se presentan en la Tabla 10. Los cálculos realizados se pueden ver en los anexos.

Tabla 10: Resultados de capacidad de carga por fuste (KN)

Pilote	Meyerhof	Burland	Mansur y Hunter	API
P-1	1860	7808	6049	4653
P-2	1557	8432	6458	4968

4.2 Evaluación comparativa de capacidad de carga calculada vs resultados de PDA

4.2.1 Evaluación comparativa para punta

4.2.1.1 Pilote P-1

En la Figura 18 se muestra una comparación gráfica entre las cargas por punta (Q_p) calculadas utilizando los métodos analíticos descritos en el capítulo 1 con los resultados de las pruebas de cargas dinámicas aplicadas a cada pilote. Además, en la Figura 18 se evaluaron las capacidades de carga considerando la formación de un tapón en la punta del pilote como se muestra a continuación.

Figura 18: Comparativo de capacidad de carga de métodos analíticos vs PDA considerando formación de tapón pilote P-1. Fuente propia

Como resultado, se puede apreciar que, al considerar la formación de tapón entre la punta de un pilote de acero tubular y estrato de grava arenosa, los valores de capacidad de carga superan en demasía los valores obtenidos en los PDA. Siendo el método de Janbu el que estimó un valor de capacidad portante de 6805.49 KN, siendo el más cercano al valor obtenido del PDA para el pilote P-1, que es de 635 KN. Por otro lado, el método que obtuvo un valor de capacidad de carga más alejado al del PDA, fue el método de Vesic con valor de 43627.35 KN.

Por otro lado, también se analizó una comparación entre los valores de capacidad de carga considerando la no formación de tapón entre la punta del pilote y el estrato de grava arenosa, por lo tanto, el área varía de 0.52 m² a 0.05 m². Tal que, los valores de capacidad de carga

del caso anterior se reducirían aproximadamente a la décima parte, tal como se muestra en la Figura 19.

Figura 19: Comparativo de capacidad de carga de métodos analíticos vs PDA considerando la no formación de tapón pilote P-1. Fuente propia

Para este caso, se aprecia que los valores de capacidad de carga obtenidos de las metodologías analíticas se aproximan más a los resultantes de las pruebas de carga dinámica. Es así que, en la figura 1 se puede apreciar que la capacidad de carga obtenido por el método de Janbu es la más cercana al valor obtenido de la prueba de carga dinámica, siendo iguales a 642.68 KN y 635 KN respectivamente y con una diferencia porcentual del 1% entre estos. Por otro lado, el método de Vesic vuelve a ser el método con valor resultante más alejado al PDA, siendo el primero igual a 4120 y con una variación porcentual de 549% respecto al PDA.

También se realizó un análisis comparativo adicional para determinar el aporte porcentual a la capacidad de carga que representa considerar el factor N_y^* en el cálculo con el fin de conocer si es recomendable tenerlo en cuenta o no para el cálculo. En la Figura 20 se muestra el aporte porcentual del N_y^* y N_q^* respecto a la capacidad por punta sin tomar en cuenta el N_c^* ya que para los pilotes estudiados no existen estratos cohesivos

Figura 20: Incidencia porcentual de los factores N_y^* y N_q^* a la capacidad por punta pilote P-1. Fuente propia

De la figura anterior, se aprecia que el aporte del N_y^* varía entre 2 a 3% de la capacidad de carga total, entendiéndose que este valor disminuiría si hubiera aporte por cohesión del estrato de cimentación.

4.2.1.2 Pilote p-2

Para el pilote P-2, se realizó el mismo análisis que en el pilote P-1. Esta comparación gráfica entre las cargas por punta (Q_p) calculadas utilizando los métodos analíticos descritos en el capítulo 1 y los resultados de las pruebas de cargas dinámicas aplicadas a cada pilote se muestra en la Figura 21. Asimismo, se evaluaron las capacidades de carga considerando la formación de un tapón en la punta del pilote como se muestra a continuación.

Figura 21: Comparativo de capacidad de carga de métodos analíticos vs PDA considerando formación de tapón pilote P-2. Fuente propia

Como resultado, se puede apreciar que, al considerar la formación de tapón entre la punta de un pilote de acero tubular y estrato de grava arenosa, los valores de capacidad de carga superan en demasía los valores obtenidos en los PDA. Siendo el método de Janbu el que estimó un valor de capacidad portante de 7008 KN, siendo el más cercano al valor obtenido del PDA para el pilote P-3, que es de 875 KN. Por otro lado, el método que obtuvo un valor de capacidad de carga más alejado al del PDA, vuelve a ser el de Vesic con valor de 53971.86 KN.

Por otro lado, se realizó una comparación entre los valores de capacidad de carga considerando la no formación de tapón entre la punta del pilote y el estrato de grava arenosa, variando el área de 0.52 m² a 0.05 m². Por lo tanto, los valores de capacidad de carga del caso anterior se reducirían aproximadamente a la décima parte, tal como se muestra en la Figura 22.

Figura 22: Comparativo de capacidad de carga de métodos analíticos vs PDA considerando la no formación de tapón pilote P-2. Fuente propia

Para este caso, se aprecia que los valores de capacidad de carga obtenidos de las metodologías analíticas se aproximan más a los resultantes de las pruebas de carga dinámica. Es así que, en la figura 1 se puede apreciar que la capacidad de carga obtenido por el método de Janbu es la más cercana al valor obtenido de la prueba de carga dinámica, siendo iguales a 661.81 KN y 875 KN respectivamente y con una diferencia porcentual del 24% entre estos. Por otro lado, el método de Vesic es el método con valor resultante más alejado al PDA, siendo el primero igual a 5096.90 con una variación porcentual de 483% respecto al PDA.

Figura 23: Incidencia porcentual de los factores Ny^* y Nq^* a la capacidad por punta pilote P-2. Fuente propia

En la Figura 23, se aprecia que el aporte del Ny^* varía entre 2 a 3% de la capacidad de carga total, entendiéndose que este valor disminuiría si hubiera aporte por cohesión del estrato de cimentación.

4.2.2 Evaluación comparativa para fuste

4.2.2.1 Pilote P-1

La evaluación comparativa entre métodos analíticos y resultados de ensayos de prueba dinámica PDA para el pilote P-1 puede visualizarse en la Figura 24.

Figura 24: Capacidad de carga por fuste. Métodos analíticos vs PDA pilote P-1. Fuente propia

Para el pilote P-1 se puede observar que 2 de los métodos utilizados sobrestiman los valores de capacidad de carga obtenidos en campo por los ensayos PDA a excepción de Meyerhof y el API, los cuales subestima este valor. En la Tabla 11 se puede observar que la relación entre la capacidad de carga por fuste obtenida por métodos analíticos (Q_s analítico) y la capacidad por fuste de los ensayos PDA (Q_s PDA) arroja valores que van de 0.35 a 1.49. Siendo 0.35 para Meyerhof, lo que indica que la carga estimada mediante el método de este autor representa menos de la mitad de la capacidad de carga obtenida por ensayos PDA en campo, esto sugiere que este método es el más conservador respecto a los otros. En cambio, para Burland la relación de Q_s analítico y Q_s PDA arroja un valor de 1.49, que indica que la capacidad por fuste calculada por este autor excede en casi un 50% al valor obtenido por los ensayos PDA, lo cual sugiere que este método es el menos conservador. El método de Mansur y Hunter tiene una relación de 1.15, lo que indica que mediante este método se obtiene un valor numéricamente muy similar a lo obtenido por ensayos PDA, aunque sobrestimándolo. Respecto al método API, este tiene una relación de Q_s analítico y Q_s PDA de 0.89. Entonces este método obtuvo la capacidad más parecida a los resultados PDA, aún más que con el método de Mansur y Hunter. Además, este método también subestima la capacidad del pilote, pero en menor porcentaje que Meyerhof.

Tabla 11: Comparación de capacidad de carga por fuste. Métodos analíticos vs PDA pilote P-1

PILOTE P-1			
Método	Q_s analítico (KN)	Q_s PDA (KN)	$\frac{Q}{Q \text{ PDA}}$ analítico /
Meyerhof	1860.3	5255	0.35
Burland	7807.5	5255	1.49
Mansur y Hunter	6049.2	5255	1.15
API	4653.3	5255	0.89

4.2.2.2 Pilote P-2

La evaluación comparativa entre métodos analíticos y resultados de ensayos de prueba dinámica PDA para el pilote P-2, se puede visualizar en el siguiente gráfico.

Figura 25: Capacidad de carga por fuste. Métodos analíticos vs PDA pilote P-2. Fuente propia

Para el pilote P-2 se puede observar que, de manera similar, en el pilote P-2, Burland y Mansur y Hunter sobrestiman los valores de capacidad de carga obtenidos en campo por los ensayos PDA, mientras que Meyerhof y API subestiman estos valores. En la Tabla 12 se puede observar que la relación entre la capacidad de carga por fuste mediante métodos analíticos (Q_s analítico) y la capacidad por fuste de los ensayos PDA (Q_s PDA) arroja valores que van de 0.27 a 1.48 (valores muy similares a lo obtenido para el pilote P-1). Siendo 0.27 para Meyerhof, que indica que la carga estimada mediante el método de este autor representa menos de la tercera parte de la capacidad de carga obtenida por ensayos PDA en campo, por lo cual este método es el más conservador respecto a los otros. En cambio, para Burland la relación de Q_s analítico y Q_s PDA arroja un valor de 1.48, que indica que la capacidad por fuste calculada por este autor excede en casi un 50% al valor obtenido por los ensayos PDA. Esto indica que este método es el menos conservador. El método de Mansur y Hunter tiene una relación de 1.13 obteniéndose un valor numéricamente muy similar a lo obtenido por ensayos PDA. Respecto al método API, este tiene la relación de Q_s analítico y Q_s PDA de 0.87, al igual que Mansur y Hunter es numéricamente similar a la capacidad calculada por el PDA, pero API subestima esta capacidad.

Tabla 12: Comparación de capacidad de carga por fuste. Métodos analíticos vs PDA pilote P-2

PILOTE P-2			
Método	Qs analítico (KN)	Qs PDA (KN)	Q analítico / Q PDA
Meyerhof	1556.7	5695	0.27
Burland	8432.4	5695	1.48
Mansur y Hunter	6458.1	5695	1.13
API	4967.8	5695	0.87

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Evaluación comparativa entre métodos analíticos y resultados de ensayos de carga para punta

Como se pudo observar en el análisis comparativo de la capacidad de carga por punta con los resultados de PDA, la situación donde los valores de capacidad de carga fueron calculados con las metodologías analíticas considerando que no se formaba un tapón en el suelo fue la que tuvo la mayor cercanía entre capacidad de cargas calculadas con los resultados de PDA, sin embargo, al instalarse en estrato de suelo gravoso arenoso de alta fricción debió formarse un tapón en la parte interna del pilote. Esta interrogante sumada a la limitada información respecto a las curvas de onda que se posee y parámetros geotécnicos más exactos de los estratos gravosos complica el trabajo de definir el comportamiento del suelo y sustentar de forma apropiada el comportamiento del suelo en este. Sin embargo, se intentó definir una situación con la información trabajada y a continuación se describirá el procedimiento lógico realizado.

Como primera consideración, la principal característica de los pilotes estudiados es su gran longitud, en general poseen longitudes cercanas a 40 m, y estos están cimentados a través de estratos granulares y gravosos. Esta gran longitud pudo afectar el desarrollo de resistencias en la zona de la punta, es decir, durante el procedimiento de hinca y monitoreo con el PDA, las solicitudes de carga para la estructura de cimentación fueron alcanzadas solo con el aporte por fuste del pilote. Dando como consecuencia, que el ensayo de hinca y PDA se detengan al cerciorarse que ya no era necesario ocupar mayor profundidad de hinca. Como segunda consideración, se toma en cuenta que los informes de PDA con los que se contaron informaban como capacidad de carga final las mostradas como resultados de PDA y que se cumplieron todas las condiciones requeridas para el ensayo de acuerdo a la norma ASTM D4945. Por lo que una razón por la que lectura de la capacidad de carga en la punta no haya sido leída como se debe, es que el martillo de hincado no tuvo el suficiente peso para desplazar la punta del pilote lo suficiente para que generen las resistencias que permitirían formar el tapón en la punta generando los valores de capacidad portante ya mostrados en el capítulo 2. Finalmente, tomando en cuenta que las consideraciones descritas, se concluyó que no se formó tapón en la punta del pilote de acero tubular, debido a que su gran longitud generó suficiente capacidad portante de fuste para que no existiera la necesidad de continuar el hincado y poder generar condiciones para la formación del tapón en la punta. Por último,

se logró determinar que el factor de aporte del peso unitario a la capacidad de carga por punta del pilote varía entre 2 a 3%, por lo tanto, no será necesario que se tome en cuenta al ser un valor mínimo.

5.2 Evaluación comparativa entre métodos y resultados de ensayos de carga para fuste

Como se pudo observar en la sección de información utilizada, los dos pilotes analizados son similares, ya que son tubulares de acero con el mismo diámetro y con longitudes de penetración en el suelo entre 39 y 40 m. Además, Los perfiles estratigráficos relacionados a cada pilote, muestran que a partir de una profundidad de 22 y 23 m se encuentra un suelo del tipo grava.

En el proyecto al que pertenecen los pilote estudiados, dividieron la exploración del suelo en fase tierra (zonas cercanas a la playa) y fase agua (zonas en el mar). De acuerdo a los perfiles estratigráficos los estratos de suelo que sobreyacen a la grava densa en la fase agua son suelos orgánicos y arcillas muy blandas cuyos valores de numero de golpes SPT son muy bajos. Los pilotes P1 y P2 fueron hincados en la zona denominada fase tierra. En esta zona los estratos de suelo que sobreyacen a la grava densa son arenas o limos con numero de golpes SPT que van de 4 a 18 para el pilote P1, y de 1 a 17 para el pilote P2. Entonces si bien es cierto que estos estratos superficiales aportan a la resistencia por fuste, el aporte no es muy relevante. Esto se puede visualizar en la hoja de cálculo del Anexo 1 y 2. Donde se observa que casi el total de la capacidad por fuste teórica calculada se desarrolla en la longitud de pilote empotrada en la grava.

Del análisis realizado en los 2 pilotes se pudo observar que los resultados de capacidad de carga por fuste teóricos tienen el mismo comportamiento en los dos casos. Es decir, en los dos pilotes se obtuvo los resultados analíticos menos conservadores mediante Burland, los resultados más conservadores mediante Meyerhof, y los resultados que se acercan numéricamente más a la capacidad por fuste calculada por el ensayo de carga dinámica (PDA) son mediante los métodos de Mansur - Hunter y del API.

Respecto a Meyerhof. Este método arroja resultados de capacidad de carga por fuste bajos, en comparación a los otros métodos, principalmente debido a la consideración de este autor en la cual asume que la fricción unitaria ($f = \sigma_v K \tan \delta$) se incrementa con la profundidad hasta una longitud critica (15 a 20 veces el diámetro), a partir de la cual la fricción permanece

constante. Al aplicar esta consideración a los cálculos, la capacidad de carga por fuste se reduce considerablemente.

Respecto a Burland; mediante este método se obtuvieron los resultados de capacidad de carga por fuste más altos. En los dos pilotes se puede observar que la capacidad de carga calculada por este método sobrestima la del PDA en porcentajes que van desde 48 a 50%. Esto se da principalmente por que el ángulo de fricción entre suelo - pilote δ que recomienda este autor es muy elevado en comparación a lo recomendado por los otros autores. Los ángulos δ utilizados para el estrato de grava se pueden ver en la Figura 26. Se puede observar como el ángulo de fricción suelo-pilote δ recomendado por Burland es mayor a los recomendados por los otros autores. Siendo la fricción f dependiente del valor de δ , el valor de la fricción se ve afectada por el valor que se tome de δ . Es decir, mientras mayor sea el ángulo de fricción entre el material del pilote y el suelo, mayor es la fricción unitaria, y por consiguiente mayor es la capacidad por fuste calculada.

Fricción material del pilote - suelo δ			
Meyerhof	Burland	Mansur y Hunter	API
20.38	35.75	22.00	22.00

Figura 26: Tabla de ángulos de fricción entre material del pilote y suelo usado para grava. Adaptado de los autores API, Meyerhof, Burlan y Mansur & Hunter.

Otro valor que afecta directamente a la fricción unitaria según la teoría de Coulomb en la que se basan estos autores, es la presión lateral del suelo K . En la Figura 27 se muestran los valores de K usados para la grava.

Factor de presión lateral K			
Meyerhof	Burland	Mansur y Hunter	API
0.35	1.00	1.30	1.00

Figura 27: Ángulos de fricción entre material del pilote y suelo usados para grava. Adaptada de los autores Meyerhof, Burland y Mansur & Hunter

Se puede ver que el menor valor de K , igual a 0.35, es el de Meyerhof, lo cual afecta en los resultados bajos obtenidos por este autor, mientras que los otros autores utilizan valores de K más altos. El valor de K que utiliza Burland, que es 1, no es el más alto, sin embargo, este es el método mediante el cual se obtienen resultados más elevados debido al valor que este

autor usa para la fricción suelo – pilote δ . Entonces se puede intuir que la fricción entre el material del pilote y el suelo δ es más influyente que el coeficiente de presión lateral K en el valor de la fricción unitaria f .

Respecto al método del API, lo calculado en los dos pilotes se acerca numéricamente a los resultados del PDA. En el pilote P-1 subestima la capacidad de carga del PDA en un 11% y en el pilote P-2 también subestima la carga del PDA, pero en un 13%. Respecto al método de Mansur y Hunter, de manera similar al método del API, se obtuvieron resultados numéricamente próximos a los resultados del PDA, pero en este caso sobrestimando la capacidad calculada por los ensayos PDA en un 15 y 13% respectivamente.

Es importante recordar que las capacidades de carga teóricas calculadas fueron capacidades ultimas, es decir, que no fueron afectadas por algún factor de seguridad. En caso de que se calcularán capacidades admisibles, estos valores serian menores y el método que se acercaría más a los resultados del PDA sería el método de Mansur y Hunter.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se concluye que la Hipótesis es verdadera para el cálculo de capacidad de carga por fuste, ya que en el número de pilotes analizados se evidenció que los valores de capacidad de carga por fuste más cercanos a los resultados de PDA pertenecían a una misma metodología.
- Siguiendo el concepto de la no formación de tapón, el método de Janbu es el que estima valores de capacidad de carga más cercanos a los de la prueba PDA con una diferencia del 1% para el primer pilote. Para el pilote 02, los métodos de Meyerhof, Hansen y Janbu son los que obtienen los resultados más cercanos a los de la prueba PDA, siendo Meyerhof y Hansen los que estiman valores mayores a los del PDA en un 22% y 23%, y Janbu el que resulta en un valor menor en 24% al del PDA.
- Se concluye que el método que obtiene los resultados de capacidad de carga por fuste más cercanos a los resultados obtenidos por ensayos de pruebas de carga dinámica PDA para pilotes tubulares de acero hincados en estratos de suelo no cohesivo en la costa del Callao es el método del API (American Petroleum Institute). En esta investigación los resultados obtenidos por este método subestiman la capacidad del PDA máximo en un 13%.
- Como se puede apreciar en la sección de análisis de resultados. La variación de la capacidad por fuste obtenida por los distintos autores está directamente relacionada a los valores que se usan para los coeficientes (K) y (δ). Los valores de estos coeficientes se obtienen de la experimentación en distintos suelos y pilotes, por lo que para obtener valores más precisos de capacidad de carga mediante métodos analíticos es necesario la experimentación en suelos locales, ya que los valores de coeficientes utilizados en esta investigación son los recomendados por sus autores en base a sus experimentos en suelos extranjeros. Por esta razón se recomienda realizar experimentos en base a pruebas de carga estáticas y dinámicas en suelos locales para obtener valores de los coeficientes de (K) y (δ) que representen mejor las condiciones del suelo y permitan estimar valores de capacidad de carga más cercanos a los resultados obtenidos de ensayos de campo realizados en los pilotes.

- Para el cálculo de la capacidad de carga por punta en pilotes de acero tubular cimentados en estratos de arena limosa y grava arenosa, no es necesario tomar en cuenta el aporte del factor del peso unitario (N_y^*), ya que estos valores suelen ser despreciables con respecto al aporte del ángulo de fricción (N_q^*)

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alva, J. (1993) *Cimentaciones profundas. Seminario cimentaciones de estructuras. Comité peruano de mecánica de suelos, fundaciones y mecánica de rocas*. Recuperado de <https://es.slideshare.net/simonmelgarejo/diseo-de-cimentaciones-dr-ing-jorge-alva-hurtado> (Consulta: 09 de abril del 2018).

American Society of Testing Materials (ASTM) (2017): Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations (ASTM D 4945). Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D4945.htm>

Barreto, A. (2011). *Evaluación comparativa de la capacidad de carga en cimentaciones profundas. Formulas analíticas y ensayos de carga*. (tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín: Colombia). Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/6840/1/43987506.2011.pdf> (Consulta: 11 de abril del 2018).

Bowles, L. E. (1996). *Foundation analysis and design*. McGraw-hill.

Brinkegreve, R. (2012). *The future of the finite element method in geotechnics*. Telf The University, (tesis de maestria, Delft University of Technology, Facultad de Ingenieria Civil y Geotecnia, Estocolmo: Suecia). Recuperado de <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:591d4684-9457-45fc-b357-6ea87f062529?collection=research> (Consulta: 11 de abril del 2018).

Bogumil, W. (2015). Pile Load Capacity – Calculation Methods. *Studia Geotechnica et Machanica*. 37(4): 83-93.

Bullock, Paul (2002) Advantages of Dynamic Pile Testing (consulta: 22 de marzo del 2018) (<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784412084.0048>).

Eslami A., Tajvidi I., & Karimpour M. (2014) Efficiency of methods for determining pile axial capacity-applied to 70 cases histories in Persian Gulf northern shore. *International Journal of Civil EGINEERING*, 12(1), 45-54.

Fellenius, B. (2018). Basics of foundation design. Electronic edition. Recuperado de <https://www.unisoftgs.com/uploaded/file/RedBook.pdf> (Consulta: 10 de abril del 2018).

Hassan M., Kashkooli A. & Saeedi - Azizkandi. (2012). Prediction of pile shaft resistance using cone penetration tests (CPTs). *Computer and Geotechnics*. 45: 74 – 82

Lara, R. (2014). Comparación entre pruebas de carga estática y pruebas de carga dinámica para pilotes hincados en el Perú. (Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil. Lima: Perú). Recuperado de http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/2549/1/lara_lj.pdf [Consulta: 10 de abril de 2018]

Momenia E., Maizira H., Gofara N. & Nazira R. (2013). Comparative Study on Prediction of Axial Bearing. Capacity of Driven Piles in Granular Materials. *Journal Teknologi*, 61:15-20.

Pizarro, J. & Romero, J. (2017) *Análisis Comparativo de Asentamiento y Capacidades de Carga Evaluados y Esperados en Pilotes Perforados en los Puentes Fortaleza y Crisneja*. (Tesis de Grado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Facultad de Ingeniería. Lima: Perú). Recuperado de https://repositorioacademico.upc.edu.pe/upc/bitstream/10757/622488/1/pizarro_ja.pdf. (Consulta: 8 de abril de 2018).

Rodríguez, E., & Sánchez, M. (2013) *Análisis comparativo de capacidad portante y asentamientos de pilotes a partir de ecuaciones semiempíricas, modelos numéricos y ensayos CPTU*. Recuperado de http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/eventos/2013/cf/siisg/memorias/documentos/2_17Analisis_comparativo_pilotes.pdf (Consulta: 11 de abril del 2018).

Rajagopal C., Solanki C. & Tandel Y. (2012). Comparison of Static and Dynamic Load Test of Pile. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17 (1): 1904 -1915

Shooshpasha I., Hasanzadeh A.& TaghaviA. 2013. Prediction of the Axial Bearing Capacity of Piles by SPT - based and Numerical Design Methods. *International Journal of Geomate*. 4 (2): 560 - 564

Tomislav I., Bačić M., & Lovorka L. (2013) Estimation of bored pile capacity and settlement in soft soils. *Građevinar*, 65(10), 901-918.

Tomlinson, M.J; 1994. Foundation Design and Construction, 6th ed, Longman.

Urbina, F. (2004). *Guía para el diseño de pilotes*. (tesis de licenciatura, Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, Piura: Perú). Recuperado de https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1370/ICI_114.pdf (Consulta: 11 de abril del 2018).

Vanapalli.S. & Tayln Z. (2012). Design of Single Piles Using the Mechanics of Unsaturated Soils. *Interntionarl Journal of Geomate*. 2(1): 197-204

Vesic, A. S. (1977). Design of pile foundations. *NCHRP synthesis of highway practice*, (42).

Wrana B. (2015) Pile load capacity and calculation methods. *Studia Geotechnica et Mechanica*. 37(4), 81-93

8 ANEXOS

Anexo 1: Cálculo de capacidad de carga por fuste por métodos analíticos para el pilote P-1

Perfil	prof.	σ' (kPa)	N	L(m)	Area lateral (m ²) / A_s	ϕ'	datos				Factor de presión lateral K				Fricción material del pilote-suelo δ				$f = \sigma'_v K \tan \delta$				Capacidad por fuste Q_s			
											Meyerhof $L_{cr}=12$	Burland	Mensury Hunter	API	Meyerhof $L_{cr}=12$	Burland	Mensury Hunter	API	Meyerhof $L_{cr}=12$	Burland	Mensury Hunter	API	Meyerhof $L_{cr}=12$	Burland	Mensury Hunter	API
Arena fina mal graduada, medianamente densa, saturada, marrón claro	1.50	7.60	12																							
Arena fina mal graduada, suelta, húmeda, marrón claro	6.50	32.10	8																							
Arena fina mal graduada, medianamente densa, saturada, marrón claro	9.00	44.80	15	9	22.98	30.52					0.49	0.50	1.30	1.00	15.26	25.52	11.00	11.00	6.02	10.69	11.32	8.71	138.24	245.78	260.17	200.13
Limo de baja plasticidad, medianamente compacto, saturado, plomo oscuro	13.00	61.40	5	4.00	10.21	28.59					0.52	0.50	1.30	1.00	14.30	23.59	11.00	11.00	8.16	13.41	15.52	11.93	83.33	136.93	158.47	121.90
Limo de baja plasticidad, muy compacto, saturado, plomo oscuro	16.50	76.50	19																							
Limo de baja plasticidad, medianamente compacto, saturado, plomo oscuro	18.00	82.60	4																							
Limo de baja plasticidad, medianamente compacto, saturado, plomo oscuro	23.00	102.40	8	10	25.53	30.12					0.50	0.50	1.30	1.00	15.06	25.12	11.00	11.00	24.68	24.01	25.88	19.90	630.29	613.00	660.74	508.26
Grava arenosa, mal graduada, densa, saturada, plomo	39.00	231.60	-	16	40.86	40.75					0.35	1.00	1.30	1.00	20.38	35.75	22.00	22.00	24.68	166.73	121.64	93.57	1008.46	6811.81	4969.87	3822.98
																						Q_s (kN)	1860.32	7807.52	6049.25	4653.27

Anexo 2: Cálculo de capacidad de carga por fuste por métodos analíticos para el pilote P-2

datos										Factor de presión lateral K				Fricción material del pilote - suelo δ				$f = \sigma'_v K \tan \delta$				Capacidad por fuste Qs			
Perfil	prof.	σ' (kPa)	N	L (m)	Area lateral (m2) As	ϕ'	Meyerhof Lcr1=12	Burland	Mansury Hunter	API	Meyerhof Lcr1=12	Burland	Mansury Hunter	API	Meyerhof Lcr1=12	Burland	Mansury Hunter	API	Meyerhof Lcr1=12	Burland	Mansury Hunter	API			
Arena fina mal graduada, suelta, húmeda, marron claro	2	10.3	7																						
Arena fina mal graduada, medianamente densa, saturada, marron claro	4.45	23.4	11	4.45	11.36	29.75	0.50	0.50	1.30	1.00	14.88	24.75	11.00	11.00	3.13	5.39	5.91	4.55	35.56	61.26	67.15	51.65			
Arena limosa, mal graduada, medianamente densa, saturada marron claro	8	39.9	14																						
Arena limosa, mal graduada, muy suelta, saturada, color plomo. Finos organicos	10	48.8	1																						
Arena limosa, mal graduada, medianamente densa, saturada marron claro	12	58.2	14	7.55	19.28	29.93	0.50	0.50	1.30	1.00	14.96	24.93	11.00	11.00	7.79	13.52	14.70	11.30	150.16	260.56	283.31	217.93			
Limo arenoso, ligeramente organico, de baja plasticidad, medianamente compacto, suelto, saturado, marron claro	14	66.6	3	2	5.11	28.00	0.53	0.50	1.30	1.00	14.00	23.00	11.00	11.00	19.18	14.14	16.84	12.95	97.93	72.22	86.01	66.16			
Limo de baja plasticidad, medianamente compacto, saturado, plomo oscuro	16	75.0	13																						
Limo de mediana plasticidad, blanco, saturado, plomo oscuro	19	82.7	2																						
Limo de baja plasticidad, medianamente compacto, saturado, plomo oscuro	21	88.4	5																						
Limo de baja plasticidad, muy compacto, saturado, plomo oscuro	22	91.4	17	8	20.43	29.81	0.50	0.50	1.30	1.00	14.90	24.81	11.00	11.00	19.18	21.11	23.08	17.76	391.72	431.33	471.58	362.75			
Grava arenosa, mal graduada, densa, saturada, plomo	40	229.9	-	18	45.96	40.75	0.35	1.00	1.30	1.00	20.38	35.75	22.00	22.00	19.18	165.50	120.75	92.89	881.37	7607.03	5550.06	4269.28			
																			Qs (kN)	1556.73	8432.41	6458.10	4967.77		

Anexo 3: Cálculo de la capacidad de carga por punta del pilote P-1 sin considerar tapón.

PARÁMETROS GEOTECNICOS									
Sobre Cementación									
Peso Unitario	y1 prom	11.69	KN/m3						
Presion del terreno	q	224.9	KN/m2						
Bajo Cementación									
Ángulo de Fricción	φ'	40.75	°	Nq	90.50	TERZAGHI	VESIC	MEYERHOF	HANSEN
				Nc	103.87		230.19	71.32	80
				Ny	110.06		265.99	81.61	
Peso Unitario 2	y2	15.39	KN/m3				296.22	108.49	
Cohesión	C	0.00	KN/m2	Sq	-		1.02	1.01	
				Sc	-		1.02	1.02	
				Sy	-		0.99	0.99	
Índice de rigidez reducido	Irr	61.53		dq	-		1.27	1.27	
Índice de rigidez	Ir	72.13		dc	-		1.62	1.62	
Deformación unitaria volumétrica	Δ	0.0024		dy	-		-	-	
Módulo de elasticidad del suelo	Es	100000.00	KN/m2						
Relación de Poisson del suelo	μs	0.34		K	147.19			4.759701	
Coef. De presión de tierra	Ko	0.35							
Superficie de fallas según Janbu	ψ	90	[60;90]						
	m	1000							
GEOMETRÍA									
Ancho del pilote	B	0.81	m	qu	20765.60		84081.71	21213.96	36576.54
Laonitud del pilote	L	0.81	m	Qu	1017.51		4120.00	1039.48	1792.25
Desplante	Df	39.12	m						
L/D		0.020777096							
Área	A	0.05	m2						
Capacidad real	Qr	875	KN						

Anexo 4: Cálculo de la capacidad de carga por punta del pilote P-2 sin considerar tapón.

PARÁMETROS GEOTECNICOS						
Sobre Cimentación						
Peso Unitario	11.52	KN/m3				
Presion del terreno	231.8	KN/m2				
Bajo Cimentación						
Ángulo de Fricción	40.75	°				
Peso Unitario 2	15.39	KN/m3				
Cohesión	0.00	KN/m2				
Índice de rigidez reducido	76.12					
Índice de rigidez	93.68					
Deformación unitaria volumétrica	0.00					
Módulo de elasticidad del suelo	100000.00	KN/m2				
Relación de Poisson del suelo	0.34					
Coef. De presión de tierra	0.35					
Superficie de fallas según Janbu	90	[60;90]				
	1000					
GEOMETRÍA						
Ancho del pilote	0.81	m				
Laongitud del pilote	0.81	m				
Desplante	40.25	m				
L/D	0.000917899					
Área	0.05	m2				
Capacidad según PDA	875	KN				

Anexo 5: Cuadros de capacidades de carga obtenidos con las metodologías analíticas considerando tapón y sin tapón, además de los ensayos PDA.

PILOTE 1			
Metodo	S/Tapón	C/Tapón	PDA (KN)
Terzaghi	1017.51	9475.89	635
Vesic	4120.00	43627.35	635
Meyerhof	1039.48	11007.26	635
Hansen	1043.55	11050.31	635
Janbu	642.68	6805.49	635
C & C	1792.25	18978.42	635

PILOTE 2			
Metodo	S/Tapón	C/Tapón	PDA (KN)
Terzaghi	1048.12	11098.71	875
Vesic	5096.90	53971.86	875
Meyerhof	1070.14	11331.92	875
Hansen	1074.23	11375.23	875
Janbu	661.81	7008.00	875
C & C	1817.22	19242.86	875