



Facultad de Arquitectura e Ingeniería Civil

**Análisis comparativo de metodologías de cálculo para el
diseño de pilotes de concreto sometidos a carga lateral.**

Autor: Alex Leonardo Santafé Gualotuña

Tutor: Ing. Hugo Marcelo Otáñez Gómez, Mag

Quito, septiembre 2021.



DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, Alex Leonardo Santafé Gualotuña, con cédula de ciudadanía número 172464159-0, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



Alex Leonardo Santafé Gualotuña

C.C. 172464159-0

DECLARATORIA

El presente Trabajo de Titulación titulado:

“Análisis comparativo de metodologías de cálculo para el diseño de pilotes de concreto sometidos a carga lateral.”

Realizado por:

Alex Leonardo Santafé Gualotuña

Como requisito para la obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

Ha sido dirigido por el profesor

Ing. Hugo Marcelo Otáñez Gómez, Mag.

Quien considera que constituye un trabajo original de su autor.

Ing. Hugo Marcelo Otáñez Gómez, Mag.

TUTOR

DECLARATORIA DE PROFESORES INFORMANTES

Los profesores informantes:

Ing. Diego Xavier Jara Almeida, Msc. MBA.

Ing. Luis Alberto Soria Núñez, Msc.

Después de revisar el trabajo presentado,
Lo han calificado como apto para su defensa oral ante el tribunal
examinador

Ing. Diego Xavier Jara Almeida, Msc. MBA.

Ing. Luis Alberto Soria Núñez, Msc.

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación está dedicado a mi familia, a mi madre por haber confiado en mí y haber sido un ejemplo a seguir, a mis hermanos por ser un constante apoyo en el transcurso de mi etapa universitaria, además dedico esta investigación especialmente a mi esposa Evelyn y a mi hija Amelie, por su paciencia y comprensión sabiendo que todo sacrificio tiene su recompensa, son mi inspiración y apoyo para continuar cosechando este éxito y muchos más.

AGRADECIMIENTO

A mi madre María, por su apoyo incondicional y brindarme siempre comprensión y amor, sus palabras de aliento me dieron fuerzas para salir adelante.

A mis hermanos Galo, Karina y Lucia por darme la confianza y motivación para superarme cada día, y porque siempre estuvieron ahí en todo momento.

A Evelyn mi esposa, quien con su apoyo incondicional y fuente de mi felicidad me permitieron culminar mi etapa universitaria, junto a mi hija Amelie son testigos del arduo trabajo y esfuerzo que paso a paso me permitieron cumplir todas metas y éxitos.

Un agradecimiento especial a todos los profesores de la facultad de Ingeniería y Arquitectura, por compartir sus conocimientos y consejos durante todas las horas de clase.

RESUMEN:

El trabajo de investigación llevado a cabo en el presente documento está enfocado a cimentaciones piloteadas, introduciendo conceptos básicos del elemento, material, forma en la que se desempeña con el suelo sin profundizar en su diseño ante cargas verticales, por lo contrario, profundiza el comportamiento ante cargas laterales, al mismo tiempo resume cuatro metodologías de diseño de pilotes con carga lateral, Teoría de Elasticidad, Método de Broms, Curvas P-Y y Elementos Finitos. Las metodologías adoptadas para el análisis en el caso de estudio permitirán definir la carga lateral que soportan pilotes de diferentes longitudes y diferentes condiciones en la cabeza del pilote, induciendo un desplazamiento permisible en cada caso. Para el caso de estudio se consideró un perfil estratigráfico definido por medio de correlaciones obtenidas a partir de ensayos in-situ, los parámetros geotécnicos permitieron estimar el comportamiento coherente de la cimentación profunda ante esfuerzos laterales. Como resultado se determinó las cargas laterales por cada método, notando comportamientos diferentes en cada solución: en la teoría de elasticidad se observa un sobredimensionamiento de las capacidades del pilote, en cuanto al método de Broms indica valores menores, pero aun así son optimistas en comparación a elementos finitos y curvas P-Y, además es notorio un incremento a la resistencia de esfuerzos laterales mientras más largo es el pilote. A diferencia de los métodos por curvas P-Y y elementos finitos que mostraron un comportamiento lineal al estimar la carga lateral, es decir que los valores de carga lateral son muy cercanos y no dependen de la longitud del pilote.

PALABRAS CLAVES

Pilotes con carga lateral - Teoría de Elasticidad - Método de Broms - Curvas P-Y - Elementos Finitos.

ABSTRACT:

The research work carried out in this paper is focused on pile foundations, introducing basic concepts of the element, material, way in which it performs with the soil without deepening in its design before vertical loads, on the contrary, it deepens the behavior before lateral loads, at the same time it summarizes four methodologies of pile design with lateral load, Elasticity Theory, Broms Method, P-Y Curves and Finite Elements. The methodologies adopted for the analysis in the case study will allow defining the lateral load supported by piles of different lengths and different conditions at the pile head, inducing an allowable displacement in each case. For the case study, a stratigraphic profile defined by means of correlations obtained from in-situ tests was considered, the geotechnical parameters allowed estimating the coherent behavior of the deep foundation under lateral stresses. As a result, the lateral loads were determined by each method, noting different behaviors in each solution: in the elasticity theory an oversizing of the pile capacities is observed, while the Broms method indicates lower values, but even so they are optimistic in comparison with finite elements and P-Y curves, in addition, an increase in the resistance to lateral forces is noted the longer the pile is. Unlike the P-Y curves and finite element methods, which showed a linear behavior when estimating the lateral load, values are very close and do not depend on the length of the pile.

KEY WORDS

Piles with lateral load - Elasticity theory - Broms method - P-Y curves - Finite elements.

Tabla de Contenido

1	CAPÍTULO I:.....	1
1.1	Introducción	1
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivo General	2
1.2.2	Objetivos Específicos.....	2
1.3	Identificación y Descripción del Problema	3
2	CAPÍTULO II: Marco Teórico.....	4
2.1	Pilote.....	4
2.1.1	Partes del pilote	4
2.1.1.1	Cabeza	5
2.1.1.2	Punta	5
2.1.1.3	Fuste.....	5
2.1.2	Clasificaciones de los Pilotes por el Tipo de Material.	5
2.1.2.1	Pilotes de Concreto.....	5
2.1.2.2	Pilotes Metálicos	7
2.1.2.3	Pilotes de Madera.....	8
2.1.2.4	Pilotes Mixtos o Compuestos.....	8
2.1.3	Clasificaciones de los Pilotes por su forma de Trabajo.....	10
2.1.3.1	Pilotes de Punta.....	10
2.1.3.2	Pilotes de Fricción.....	11
2.1.4	Longitud de Pilote	12
2.1.5	Mecanismo de Distribución de Cargas.....	13
2.1.5.1	Prueba de Carga en Pilotes.....	13

2.1.5.2	Factor de Seguridad	14
2.1.5.3	Cargas Verticales.....	14
2.1.5.4	Cargas Horizontales	15
2.1.6	Comportamiento de Pilotes con Carga Lateral.	16
2.1.6.1	Cargas Laterales en Pilotes.....	18
3	CAPÍTULO III Métodos de Cálculo	21
3.1	Teoría de Elasticidad.....	21
3.1.1	Capacidad de Soporte Lateral del Suelo.....	22
3.1.2	Coeficientes en Suelos con Rigidez Variable en Profundidad.	23
3.1.2.1	Pilotes con Cabeza Libre	23
3.1.2.2	Pilotes con Cabeza Restringida.....	24
3.1.3	Coeficientes en Suelos con Módulo de Deformación Constante en Profundidad.	25
3.1.3.1	Pilotes con Cabeza Libre	25
3.1.3.2	Pilotes con Cabeza Restringida.....	26
3.2	Método de Broms	27
3.2.1	Suelos Cohesivos	28
3.2.1.1	Pilotes Cortos de Cabeza Libre	28
3.2.1.2	Pilotes Cortos de Cabeza Restringida	30
3.2.1.3	Pilotes Largos de Cabeza Libre.....	32
3.2.1.4	Pilotes de Longitud Intermedia con Cabeza Restringida	33
3.2.1.5	Pilotes Largos de Cabeza Restringida.....	34
3.2.2	Suelos No Cohesivos.....	35
3.2.2.1	Pilotes Cortos de Cabeza Libre	36

3.2.2.2	Pilotes Cortos de Cabeza Restringida	39
3.2.2.3	Pilotes Largos de Cabeza Libre	39
3.2.2.4	Pilotes Largos de Cabeza Restringida.....	40
3.3	Modelos P-Y	43
3.3.1	Curvas P-Y en Arcillas Blandas y Duras	44
3.3.1.1	Carga Estática	44
3.3.1.2	Carga Cíclica	46
3.3.2	Curvas P-Y en Arcillas Duras Sumergidas.....	47
3.3.2.1	Carga Estática	47
3.3.2.2	Carga Cíclica	49
3.3.3	Curvas P-Y para Arenas	50
3.4	Método Elementos Finitos (MEF)	53
3.4.1	Discretización.....	53
3.4.2	Aplicación en un Medio Geotécnico	55
4	CAPÍTULO IV Caso de Estudio	57
4.1	Definición de Parámetros de Diseño del Pilote.....	57
4.2	Definición de Perfil Estratigráfico	57
4.2.1	Perfil del Suelo	57
4.2.1.1	Litología	58
4.2.2	Parámetros de Cálculo Complementarios.....	60
4.2.2.1	Correlaciones con el valor N SPT y Módulo de Elasticidad del Suelo.	60
4.2.2.2	Correlaciones con el valor N SPT y Ángulo de Fricción.....	62

4.2.3	Correlaciones con el valor N SPT y la Resistencia al Corte no Drenado en Suelos Cohesivos.	62
4.2.3.1	Correlaciones con el valor N SPT y Peso Específico.....	65
4.2.4	Resumen de Parámetros Geotécnicos Complementarios	67
4.3	Modelación	68
4.3.1	Teoría de Elasticidad	68
4.3.2	Método de Broms.....	71
4.3.2.1	Consideraciones de Cálculo	71
4.3.3	Modelos P-Y	74
4.3.3.1	Ingreso de Datos Pilote PyPile	74
4.3.3.2	Columna de Suelo en PyPile	75
4.3.4	Elementos Finitos.....	82
4.3.4.1	Ingreso de Datos Característicos del Pilote	82
4.3.4.2	Columna Estratigráfica.....	83
4.3.4.3	Discretización del Medio	88
4.3.4.4	Condiciones de Borde del Modelo	90
4.3.4.5	Carga Lateral	91
5	CAPÍTULO V Análisis y Resultados	94
5.1	Pilotes de Cabeza Libre.....	94
5.2	Pilotes de Cabeza Empotrada	95
5.3	Método de Elástico y Método de Broms	96
5.4	Curvas P-Y y Elementos Finitos	97
5.5	Comportamiento de Pilotes con Solicitación Lateral.....	99
5.6	Comportamiento en Función de la Profundidad	102

5.6.1	Cabeza Libre.....	102
5.6.2	Cabeza Empotrada	103
6	Conclusiones y Recomendaciones.....	104
6.1	Conclusiones.....	104
6.2	Recomendaciones.....	106
	Bibliografía.....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Partes de un Pilote.	5
Figura 2.2 Pilotes de Concreto.	6
Figura 2.3 Pilotes Metálicos.....	7
Figura 2.4 Pilotes de Madera.....	8
Figura 2.5 Pilotes compuestos. a) Con perfil H relleno de concreto. b) Madera-Concreto.....	9
Figura 2.6 Pilote de Punta.	11
Figura 2.7 Pilote de Fricción.	12
Figura 2.8 Graficas de pruebas de carga sobre pilotes	14
Figura 2.9 Distribución de cargas verticales de un pórtico a la cimentación.....	15
Figura 2.10. Esquema de cargas horizontales por la acción sísmica.	16
Figura 2.11 Tipos de Carga Lateral.	17
Figura 2.12 Pilotes restringido - Pilotes con cabeza libre.	17
Figura 2.13 Representación Gráfica de resultados LPILE (Reese, 2000)	20
Figura 3.1 Factores de Rigidez Sísmica para Pilotes	22
Figura 3.2 Coeficientes de suelos con rigidez variables	23
Figura 3.3 Coeficiente de Desplazamiento.	24
Figura 3.4 Coeficiente de Momento	24
Figura 3.5 Esquema de un pilote con cabeza libre	25
Figura 3.6 Esquema de un pilote empotrado en su cabeza.....	26
Figura 3.7 Mecanismo de falla de pilotes con carga lateral.	28
Figura 3.8 Pilote corto aislado, sin restricción a la rotación en suelo cohesivo... ..	28
Figura 3.9 Mecanismo de falla de un pilote corto restringido en suelo cohesivo.	30

Figura 3.10 Solución de Broms para la resistencia lateral ultima de pilotes cortos en cohesivos..... 31

Figura 3.11. Mecanismo de falla de un pilote largo libre en suelo cohesivo. 32

Figura 3.12 Mecanismo de falla de pilotes intermedios en suelos cohesivos..... 33

Figura 3.13 Mecanismo de falla de un pilote largo restringido en suelo cohesivo. 34

Figura 3.14. Solución de Broms para la resistencia lateral ultima de pilotes largos en suelos cohesivos. 35

Figura 3.15 Modos de fallo de pilotes cortos de cabeza libre en suelos no cohesivos..... 37

Figura 3.16 Solución de Broms para la resistencia lateral última de pilotes cortos en suelos no cohesivos. 38

Figura 3.17 Mecanismo de falla de un pilote corto restringido en suelo no cohesivo. 39

Figura 3.18 Mecanismo de falla de un pilote largo libre en suelo no cohesivo... 40

Figura 3.19 Mecanismo de falla de un pilote largo restringido en suelo no cohesivo. 41

Figura 3.20 Solución de Broms para la resistencia lateral última de pilotes largos en suelos cohesivos. 42

Figura 3.21 Distribución de esfuerzos alrededor del pilote 43

Figura 3.22 Curva P-Y para carga estática..... 46

Figura 3.23 Curva P-Y para carga cíclica. 46

Figura 3.24 Valores coeficiente Ac-As..... 48

Figura 3.25 Curvas P-Y cargas estáticas para arcillas. 48

Figura 3.26 Curvas P-Y cargas cíclicas para arcillas..... 49

Figura 3.27 Curvas P-Y para Arenas 50

Figura 3.28 Coeficiente A y B para arenas.	51
Figura 3.29 Proporciones recomendadas de mallado uniforme.....	54
Figura 3.30 Detalle de malla utilizada en el entorno del pilote.....	56
Figura 3.31 Distancias aproximadas para la modelación del pilote por elementos finitos.	56
Figura 4.1 Columna de Suelo. Elaboración Propia	59
Figura 4.2 Valores de N60 y Módulos de Elasticidad. Elaboración Propia	61
Figura 4.3 Valores de N60 y Angulo de fricción y Resistencia al corte no drenado. Elaboración Propia	64
Figura 4.4 Pesos Específicos. Elaboración Propia	66
Figura 4.5 Ingreso de parámetros del pilote. PyPile	74
Figura 4.6 Tipo y espesor de los estratos. PyPile.....	75
Figura 4.7 Propiedades geotécnicas suelos sin cohesión. PyPile	76
Figura 4.8 Parámetros geotécnicos suelos cohesivos. PyPile.....	78
Figura 4.9 Configuraciones del Modelo. PyPile	79
Figura 4.10 Ajuste de Carga Lateral (Pilote Cabeza Libre). PyPile	79
Figura 4.11 Comportamiento del Pilote con la Profundidad. PyPile.....	80
Figura 4.12 Ajuste de Carga Lateral (Pilote cabeza restringida). PyPile.....	80
Figura 4.13 Comportamiento del pilote ante una carga lateral Py-Pile. PyPile ...	81
Figura 4.14 Configuración de parámetros del pilote. OpenSeesPL.....	82
Figura 4.15 Asignación del Módulo de Corte. OpenSeesPL.....	83
Figura 4.16 Definición de Suelo Granular. OpenSeesPL.....	84
Figura 4.17 Propiedades geotécnicas del Suelo Granular. OpenSeesPL.....	86
Figura 4.18 Definición de Suelo Cohesivo. OpenSeesPL.....	86

Figura 4.19 Propiedades geotécnicas del Suelo Cohesivo. OpenSeesPL.....	88
Figura 4.20 Modelo considerando todo el suelo circundante. OpenSeesPL.....	88
Figura 4.21 Modelo considerando la mitad del suelo circundante. OpenSeesPL	89
Figura 4.22 Mallado uniforme. OpenSeesPL.....	89
Figura 4.23 Mallado (Concentración de esfuerzos en la cabeza). OpenSeesPL.	90
Figura 4.24 Mallado Horizontal. OpenSeesPL.....	90
Figura 4.25 Condiciones de Borde del Modelo. OpenSeesPL.....	91
Figura 4.26 Asignación del desplazamiento admisible. OpenSeesPL	91
Figura 4.27 Comportamiento del pilote ante una carga latera.l OpenSeesPL.	93
Figura 5.1 Resultados Generales Pilotes de Cabeza Libre	94
Figura 5.2 Resultados Generales Pilotes de Cabeza Empotrada.....	95
Figura 5.3 Comparativa Mét. Elástico y Mét. Broms Pilotes de Cabeza Libre y Empotrada.....	96
Figura 5.4 Comparativa Mét. Curvas P-Y y Mét Elementos Finitos Pilotes de Cabeza Libre y Empotrada.....	97
Figura 5.5 Comportamiento ante sollicitación lateral (Pilote cuadrado 20 metros) OpenSeesPL	99
Figura 5.6 Interacción Suelo-Pilote antes que se aplique la carga lateral “vista en planta” OpenSeesPL	100
Figura 5.7 Interacción de la carga en el pilote con una deformación del 50% “vista en planta” OpenSeesPL.....	100
Figura 5.8 Interacción de la carga en el pilote con una deformación del 50% “vista 3D” OpenSeesPL.....	100
Figura 5.9 Interacción de la carga en el pilote con una deformación admisible (2cm) “vista en planta”. OpenSeesPL.....	101

Figura 5.10 Interacción de la carga en el pilote con una deformación admisible
(2cm) "vista 3D" OpenSeesPL..... 101

Figura 5.11 Grafica Profundidad vs Desplazamiento (Pilote Cabeza Libre) 102

Figura 5.12 Grafica Profundidad vs Desplazamiento (Pilote Cabeza Empotrada)
..... 103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Valores Referenciales de ϵ_{50}	45
Tabla 3.2 Valores de ϵ_{50} para arcillas sobre consolidadas.	47
Tabla 3.3 Valores de k_s para arcillas sobre consolidadas.	47
Tabla 3.4 Valores recomendados para K_{py} (Arena sumergida)	51
Tabla 3.5 Valores recomendados para K_{py} (Arena seca)	51
Tabla 4.1 Descripción de la Columna de Suelo	58
Tabla 4.2 Valores de Resistencia la Corte no Drenado	63
Tabla 4.3 Valores Geotécnicos Típicos a partir de N Para suelos Sin Cohesión	65
Tabla 4.4 Valores Geotécnicos Típicos a partir de N Para suelos Cohesivos	65
Tabla 4.5 Resumen parámetros geotécnicos	67
Tabla 4.6 Módulos de Elasticidad	68
Tabla 4.7 Resumen de Resultados Método Elástico	71
Tabla 4.8 Valores de Módulo de Reacción del Suelo	72
Tabla 4.9 Resumen de Resultados Método de Broms.....	73
Tabla 4.10 Resumen de Resultados Modelos P-Y	82
Tabla 4.11 Coeficientes para suelos cohesivos y no cohesivos	85
Tabla 4.12 Resumen de Resultados OpenSeesPL.	93
Tabla 5.1 Resumen de resultados general pilotes cabeza libre.....	95
Tabla 5.2 Resumen de resultados general pilotes cabeza empotrada	96

1 CAPÍTULO I:

1.1 Introducción

En muchas obras de ingeniería en Ecuador y a nivel mundial se ha vuelto común el uso de cimentaciones profundas, dentro de las soluciones para este caso se encuentran los pilotes, elementos de gran longitud que transmiten solicitaciones de la super estructura a un estrato resistente.

En el diseño de cimentaciones por pilotaje se conjuga varios criterios y parámetros, es así como primer paso, se analizan los datos geotécnicos del terreno, se consideran estructuras colindantes, además de que se deberá tener los datos de cargas vivas y muertas de la superestructura. Verificado lo anterior se procede a seleccionar el tipo, longitud y proceso constructivo del pilote. Conviene mencionar también la interacción que el pilote tendrá con el o los estratos adyacentes, y dado el caso el pilote trabajará con la punta o con el fuste. Es decir, el diseño de pilotes obedece principalmente a cargas verticales generadas por la estructura, sin embargo, en las cimentaciones existen cargas externas, provenientes de empujes del terreno, cargas generadas por estructuras aledañas a la edificación y principalmente de fenómenos naturales (sismos).

Ecuador al estar en una zona sísmica activa, las edificaciones siempre estarán sujetas a movimiento del suelo por la acción de este fenómeno natural, por lo tanto, si se usa pilotes como cimentación de una estructura, tal acción del sismo genera fuerzas horizontales ante el elemento de la subestructura.

La presente investigación recopila metodologías de análisis para pilotes con sollicitación lateral, comparando criterios de solución e interacción con los estratos en cada método, con el fin de cuantificar valores de cargas horizontales actuantes, sin que excedan desplazamientos permisibles en pilotes de diferentes longitudes.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Comparar el comportamiento ante cargas laterales en pilotes cuadrados de concreto pretensado de 8, 12 y 20 metros de longitud, utilizando diferentes metodologías de análisis, con el fin de decidir qué método proporciona una solución óptima de cálculo.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Validar la información de estudios geotécnicos disponibles y determinar datos generales del terreno por medio de correlaciones descritas en mecánica de suelos, para resolver las metodologías planteadas en el caso de estudio.
- Estimar la máxima carga lateral que se puede aplicar a un pilote mediante los diferentes métodos de cálculo, Teoría de Elasticidad, Método de Broms, Modelos P-Y y Elementos Finitos, para no exceder el desplazamiento admisible.
- Cuantificar los desplazamientos del pilote obtenidos en función a la carga lateral admisible aplicada, para verificar el comportamiento desarrollado a lo largo del pilote.

1.3 Identificación y Descripción del Problema

La importancia de considerar solicitaciones laterales en el diseño de pilotes es fundamental para evitar daños en las estructuras, el deterioro ocasionado en un principio llevará a suspender el uso de la infraestructura y al final esto se traducirá en pérdidas económicas, tanto en costos de funcionamiento de la edificación, como en costos elevados de mantenimiento al tratar de solucionar la falla.

En el siguiente caso Chellis (1971) muestra un ejemplo de falla por interacción de fuerzas laterales. “En Mississippi, un generador eléctrico de (200-kw) movido por un motor de combustión interna, operado a 412 r.p.m., fue instalado sobre una cimentación de concreto separada que descansaba sobre 6 pilotes verticales de aproximadamente 6 metros de largo, de acuerdo con la práctica local. El suelo del área pantanosa era de arena y arcilla aluviales de valor sustentante muy pobre. La vibración se sintió en todo el terreno de 4000 metros cuadrados. La Causa de la falla: No se previó la resistencia de fuerzas horizontales no equilibradas provenientes del equipo”. De igual manera la interacción de solicitaciones laterales provenientes de fuerzas sísmicas o empujes de terreno podría generar daños en las estructuras por desplazamientos superiores a los admisibles en cimentaciones profundas.

2 CAPÍTULO II: Marco Teórico

2.1 Pilote

El elemento que forma parte de una cimentación profunda se lo conoce como Pilote, es un tipo de columna de apoyo estructural, este puede ser fabricado in situ, sin embargo, cualquier miembro sólido prefabricado hincado hasta una cota final se denomina pilote. Las cimentaciones piloteadas comúnmente se usan para transmitir cargas de estructuras de manera gradual al estrato de suelo con una capacidad portante competente, además de soportar la carga vertical entregada por la super estructura, tiene la cualidad de absorber sollicitaciones tales como fuerzas sísmicas y empujes laterales del terreno.

El diseño de cimentaciones piloteadas obedece principalmente a dos criterios, como primera consideración está el estudio de suelos el cual proporciona, la cota en donde se encuentra el estrato con buena capacidad portante y baja tendencia a las deformaciones y finalmente la selección del tipo de pilote juntamente con el equipo de hincado a emplear.

Taylor (1960) Afirma que muchos ingenieros de cimentaciones ven en los pilotes sólo otra forma de miembros estructurales, los cuales son escogidos por razones de economía y los cuales son capaces de soportar una carga en la misma forma que lo hacen las columnas. De acuerdo con este punto de vista los pilotes se asemejan a las zapatas, y por lo tanto se considerarán como parte de la estructura y no como parte de la cimentación (pág. 718)

2.1.1 Partes del pilote

“El pilote consta básicamente de tres partes que son la cabeza, el fuste y la punta; independientemente de los materiales empleados, de su geometría o de su forma de funcionamiento (Granda Rosales & Vallejo Moscoso, 2016, pág. 12).

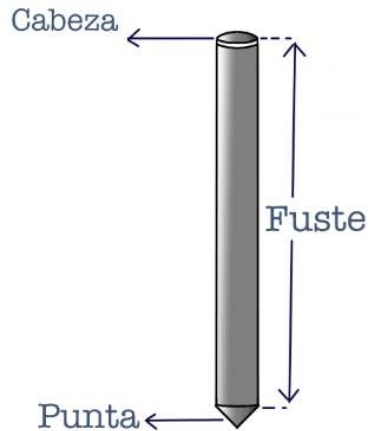


Figura 2.1 Partes de un Pilote.

Elaboración Propia

2.1.1.1 Cabeza

Es el extremo superior del pilote, generalmente queda por fuera del nivel natural del terreno.

2.1.1.2 Punta

Es el extremo inferior, la punta se encarga de transmitir las cargas de las estructuras al suelo competente.

2.1.1.3 Fuste

El fuste es el cuerpo del pilote que determina la longitud, tiene dos funciones: la primera es transmitir las cargas por medio de la fricción generada entre las paredes del pilote y el suelo adyacente, su segunda función es mediante su longitud llegar al estrato subyacente.

2.1.2 Clasificaciones de los Pilotes por el Tipo de Material.

2.1.2.1 Pilotes de Concreto

Existen dos categorías de pilotes de concreto según su proceso de construcción y colocación, los prefabricados e hincados y los colados in situ. Según Das (2011) “Los pilotes precolados se pueden preparar empleando un refuerzo ordinario y pueden tener una sección transversal cuadrada u octagonal” (pág. 540). Estos pilotes cuentan con acero de refuerzo el cual tiene dos funciones: la primera es resistir los esfuerzos por

flexión originados al momento de ser transportados e izados en su colocación, mientras que la segunda es absorber el momento flexionante debido a las solicitaciones por carga lateral y fuerzas sísmicas. Por otra parte, Jiménez Salas (1981) afirma que “una gran parte de los pilotes de concreto que se construyen actualmente lo son in situ, efectuando una perforación en el terreno que se rellena con concreto fresco y fragua ya en el interior del terreno” (pág. 893). Dichos pilotes pueden o no contener acero de refuerzo y dependiendo de cada caso su denominación será: encerrado cuando el acero es introducido dentro del terreno, a diferencia de que si el hierro es introducido en el terreno para recibir el concreto y posterior retirar el casco se denomina desforrado.

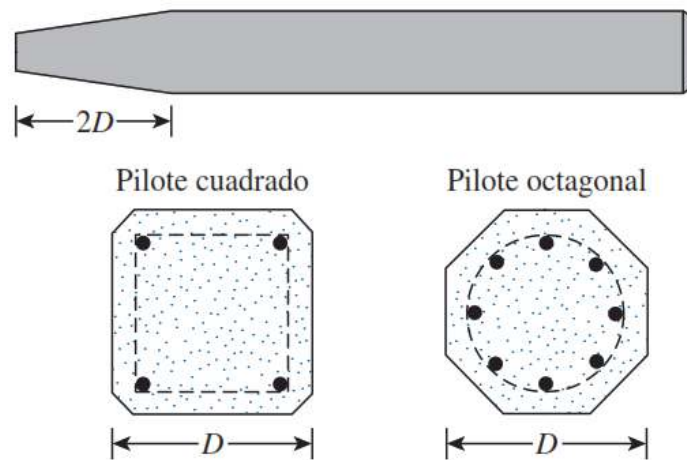


Figura 2.2 Pilotes de Concreto.

Tomada de (Braja M. Das, 2011)

2.1.2.1.1 Pilotes de concreto Pretensado

Son pilotes que entregan una resistencia a flexión y tracción mayor que los de concreto convencional, la característica de este tipo de elementos es que, al ser fundido con acero en condición de tensión, absorben esfuerzos horizontales de gran magnitud en zonas sísmicas, al mismo tiempo la resistencia la tracción es igual a la de pretensado. Este tipo de pilote se utilizan generalmente en estructuras como puentes, viaductos y en edificios de gran altura situados en zonas sísmicas.

2.1.2.2 Pilotes Metálicos

El éxito que ha tenido la implementación de pilotes metálicos en el uso de cimentaciones profundas radica en la baja relación de resistencia-peso, lo cual supone una ventaja en el manejo, transporte e izado, además que soporta un hincado mucho más pesado que los pilotes de madera, inclusive este tipo de pilotaje en algunos casos el perfil queda por fuera del nivel natural del terreno, esto hace que el pilote trabaje como columnas de la super estructura. Los pilotes metálicos están constituidos por vigas H de acero laminado, un requisito que tienen este tipo de perfil es que sus alas y alma son de igual espesor a diferencia de los pilotes constituidos por tubos que Jiménez Salas (1981) comenta “que son tubos bien sea de chapa volteada o estirados sin soldadura” (pág. 896).

Un factor a considerar en este tipo de pilotes es la acción de la corrosión en el elemento, se ha observado, a lo largo de los años un buen comportamiento ante estas patologías, en primer lugar cuando el proyectista diseña el elemento lo hace considerando un porcentaje adicional de la sección tanto en el alma como en las alas del perfil H, en otras palabras las pérdidas de sección son compensadas por el porcentaje que se aumentó en el diseño, en segundo lugar se puede generar un tipo de protección cubriendo el pilote con alquitrán de hulla además, de utilizar películas protectoras como epóxicos entre otros.



Figura 2.3 Pilotes Metálicos.

Tomado de (Codocsa S.A, 2016)

2.1.2.3 Pilotes de Madera

Actualmente el uso de pilotes de madera se orienta a estructuras donde la cimentación se va a localizar en la capa freática, es muy común ver este tipo de fundaciones profundas en un entorno marino como muelles y puertos. Los pilotes de madera usualmente se hincan como se cortan del árbol, con muy poco tratamiento, tales pilotes tendrán mejor capacidad portante si se corta en invierno por que la cantidad de moho en la madera es menor.

Debido a que es un material orgánico, está sujeto a ataques de agentes biológicos que deterioran el material, en algunos casos se utiliza recubrimiento a base de concreto para prolongar su vida indefinidamente.

Se debe enfatizar que el pilotaje con madera es satisfactorio, tanto para cargas axiales y más aún si el elemento está sujeto a fuerzas laterales, por esta razón si se usa con los criterios y diseños correctos tendrá un comportamiento apropiado tal como si se aplicara algún otro material: acero o concreto.



Figura 2.4 Pilotes de Madera.

Tomada de (Hannigan P. , Globe, Linkins, & Rausche, 2006)

2.1.2.4 Pilotes Mixtos o Compuestos

Se catalogan pilotes compuestos los conformados por dos materiales, que pueden ser concreto-acero y madera-concreto. Por lo general el rellenar de concreto pilotes con perfiles tubulares es una forma común que se presenta este caso (Figura 2.5 “a”), sin embargo, existe otro tipo de aplicación el cual consiste en combinar madera

y concreto (Figura 2.5 “b”), el objetivo de esta unión es superar los cambios de secado y humedecimiento variable cuando el pilote se encuentra en una zona de nivel freático, es así como el pilote conserva la función estructural para lo que fue proyectado.

Un criterio importante para el uso de pilotes combinados es “la formación de juntas apropiadas entre dos materiales, se conoce que conseguir dicha unión es difícil, y por esa razón, los pilotes compuestos no se utilizan ampliamente” (Das, 2011, pág. 546).

Las juntas son planos débiles que afectan considerablemente el desempeño estructural causados por la combinación de dos materiales. La disminución de las propiedades mecánicas de los materiales dependerá: de la inclinación de la junta, además en el caso del concreto influirá el tiempo de formación de la junta, a pesar de que se conoce que la existencia de las juntas puede comprometer la integridad estructural del elemento, no se conoce en que proporción decrece la resistencia mecánica.

La normativa en varios países establece que, en caso de estar en la necesidad de construir una pieza estructural con una junta fría, esta debe ser desarrollada de forma tal que la discontinuidad no interfiera en el comportamiento mecánico ni en la estabilidad. (Torres, Ramos Cañon, Prada Sarmiento, & Botía-Díaz, 2016)

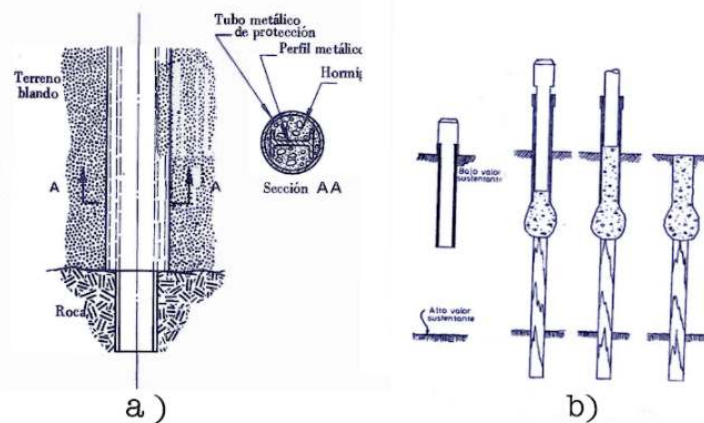


Figura 2.5 Pilotes compuestos. a) Con perfil H relleno de concreto. b) Madera-Concreto.

Modificada de (Jiménez Salas, 1981)

2.1.3 Clasificaciones de los Pilotes por su forma de Trabajo

Desde el punto de vista de la forma en que trabaja, los pilotes se clasifican en de punta, de fricción y mixtos. Los pilotes de punta desarrollan su capacidad de carga con apoyo directo en un estrato resistente. Los pilotes de fricción desarrollan su resistencia por la fricción lateral que generan contra el suelo que los rodea. Los pilotes mixtos aprovechan a la vez estos dos efectos. (Juares Badillo & Rico Rodriguez, 1973, pág. 331).

2.1.3.1 Pilotes de Punta

En el caso de pilotes que transfieren las cargas y sobrecargas de la superestructura por medio de la punta, dependen completamente de la profundidad en la que se encuentra la capa de suelo o roca cuya capacidad de carga sea aceptable, dicho en otras palabras, este tipo de pilotes trabajan como columnas o pilas que transmiten la sollicitación a una cota inferior para soportar toda la carga con seguridad Figura 2.6.

El uso de pilotes de punta supone una aceptación tácita, de que existe una capa de material firme, pero esto no es suficiente, sino que el proyectista deberá asegurarse que la condición del estrato propuesto no sea demasiado débil para soportar la carga adicional, ni tan compresible que la estructura pueda ser dañada por asentamientos diferenciales.

Para la aplicación de pilotes de punta se requieren ciertas destrezas, una de ellas es hallar la resistencia en la punta del pilote con el uso del penetrómetro estático, un ensayo en modelo reducido, con relaciones de escala que, si no son sencillas están muy experimentadas, por esta razón el ensayo es rápido y económico, sin embargo para esta práctica se debe tener un conocimiento sólido para interpretar las características tenso-deformacionales del material, además se necesita muestras inalteradas de gran calidad, para realizar ensayos triaxiales y de corte simple con alta precisión a fin de que se pueda aplicar las correcciones empíricas a los resultados para cada caso.

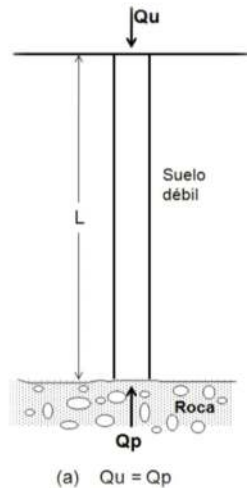


Figura 2.6 Pilote de Punta.

Tomado de (Silva, 2015)

2.1.3.2 Pilotes de Fricción

El principio básico de los pilotes de fricción es que la capacidad portante depende de la resistencia a la fricción del terreno que actúa sobre las paredes del pilote. Figura 2.7, al mismo tiempo requiere que los valores de fricción se consideren con factores de seguridad, además es importante un estudio que muestre los probables efectos de consolidación, en estratos capaces de cargas friccionantes y en estratos por debajo de las puntas del pilote o de los bulbos de presión. Este tipo de cimentación se aplica en perfiles de suelo cuando la resistencia no aumenta con la profundidad, sobre todo al verificar que la relación de incremento es muy baja, a razón de que el material blando hace que la resistencia en la punta sea casi nula y se desprecie.

La capacidad portante de los pilotes de fricción no se puede calcular con el uso de fórmulas dinámicas por que la resistencia de un pilote bajo impacto instantáneo es totalmente diferente a la resistencia a largo plazo bajo cargas estáticas permanentes. La capacidad de carga se obtiene a partir de parámetros de resistencia al esfuerzo cortante en arcillas blandas o a partir de los datos en pruebas de carga. (Juares Badillo & Rico Rodriguez, 1973).

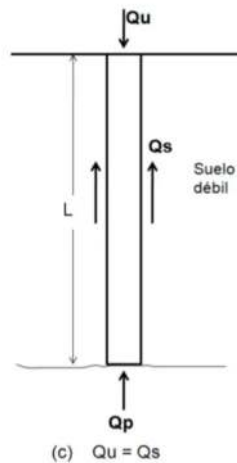


Figura 2.7 Pilote de Fricción.

Tomado de (Silva, 2015)

2.1.4 Longitud de Pilote

Para obtener una acción satisfactoria en una cimentación piloteada la longitud del pilote es un parámetro que los proyectistas estiman mediante el modo en que el elemento interactúa con el suelo. En el caso de pilotes de punta se necesitaría saber la profundidad y el espesor del estrato con buena capacidad portante, dato que proporciona las exploraciones mediante sondeos por lo que no se debe obviar la longitud de perforación, esta debe ser no menor a 30 metros a no ser que se encuentre roca o un estrato duro en una cota más alta, el número de perforaciones es parte esencial en cimentaciones con pilotes, el número de sondeos puede cambiar dependiendo si el subsuelo es variable, por lo tanto, los muestreos necesarios se definirán por la superficie y el ingeniero experto en mecánica de suelos, por último la calidad de las perforaciones se regirá a los equipos y personal certificado. De igual manera los pilotes que trabajan a fricción pura, la longitud se establece por el estrato que generalmente es de material blando, en este caso las exploraciones por sondeos deben ser igual o más importantes para estimar el espesor de el o los estratos.

En resumen, el estimar la longitud del pilote no es una tarea fácil, por las razones antes descritas no basta con la experiencia del proyectista, es un trabajo muy fino que se debe analizar en las exploraciones por sondeos.

2.1.5 Mecanismo de Distribución de Cargas

En la presente investigación se han comentado varios temas sobre pilotes, desde sus conceptos básicos, el material con el que están fabricados y la longitud estimada en función a su forma de interacción con el perfil estratigráfico, por tal motivo para iniciar y entender la distribución de cargas que produce un pilote en el suelo se deben conjugar todos estos conceptos.

2.1.5.1 Prueba de Carga en Pilotes

La prueba de carga en pilotes determina de forma segura y precisa la capacidad de carga de los pilotes, la sugerencia es que en la mayoría de los proyectos se debería realizar esta estimación de capacidad. La desventaja del método radica en su alto costo y el tiempo que se requiere llevar a cabo su ejecución, debido que podría retrasar la construcción de la infraestructura.

Generalmente este tipo de pruebas consiste en aplicar cargas gradualmente dejando trascurrir un tiempo prudente para que se generen los respectivos asentamientos, este tipo de pruebas se las denomina de carga controlada, sin embargo, existe otra aplicación del método en base a la velocidad de penetración del pilote, por último y no menos importante se encuentra la prueba mediante carga cíclica. Todas estas pruebas van a generar graficas de carga vs asentamiento (Figura 2.8).

Un desacierto que se comete es dar por terminada la prueba antes de que se haya alcanzado la falla. De ser posible se debe llevar la carga hasta la fatiga a un 150 a 200 por ciento de la carga de proyecto como describe (Chellis, 1971), además menciona que si el asentamiento no ha excedido un máximo especificado (0.025cm por tonelada de carga aplicada) la prueba se considera satisfactoria.

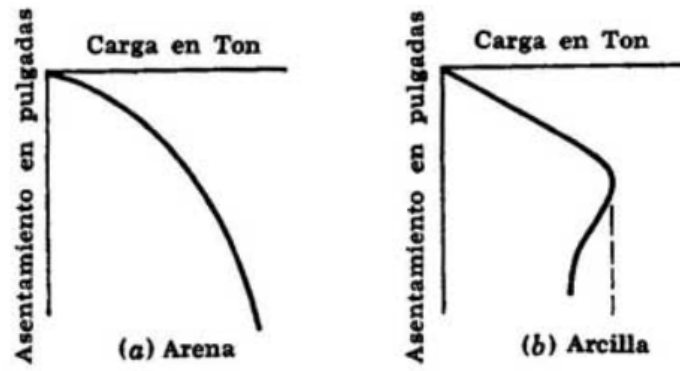


Figura 2.8 Graficas de pruebas de carga sobre pilotes

Tomado de (Taylor, 1960)

2.1.5.2 Factor de Seguridad

Se ha mencionado en apartados anteriores como se podría determinar la carga última de un pilote, el siguiente paso sería determinar la carga permisible. Esto se consigue dividiendo la resistencia última entre un factor de seguridad, siendo los pilotes un elemento estructural de gran importancia es muy popular entre los proyectistas valores de factor de seguridad de 2 a 4, sin embargo, el factor de seguridad debe considerar lo siguiente:

La incertidumbre al predecir la resistencia última de los pilotes.

La incertidumbre respecto a las cargas que actuarán realmente sobre los pilotes.

Los asentamientos permisibles.

2.1.5.3 Cargas Verticales

La superestructura produce cargas por peso muerto y peso vivo, estas solicitaciones se transmiten a la cimentación (consulte Figura 2.6 y Figura 2.7), lo que nos lleva a idealizar un mecanismo de distribución de cargas, por ejemplo, cuando la carga vertical es transmitida por las columnas al pilote, se puede conceptualizar en primer lugar que la solicitación coincide con el centro de gravedad del pilote, es decir, en este caso no tendríamos la interacción de un momento generado por la carga vertical, sin embargo no se descarta que actuará una solicitación horizontal que genera un momento flexionante en el pilote. En otro caso tendríamos la interacción de una carga vertical excéntrica en el pilote, lo que significa que ahora si hay que considerar un

momento actuante por carga vertical excéntrica, adicionando la carga lateral y el momento flexionante que esta genera. Al final esto se traduce en desplazamientos y giros que tendrá la cimentación.

En las conceptualizaciones anteriormente descritas la que más se asemeja a la realidad es la segunda, ya sea por procesos constructivos o porque no se puede tener un control exhaustivo en obra, y como consecuencia se producen estas excentricidades en los elementos estructurales.

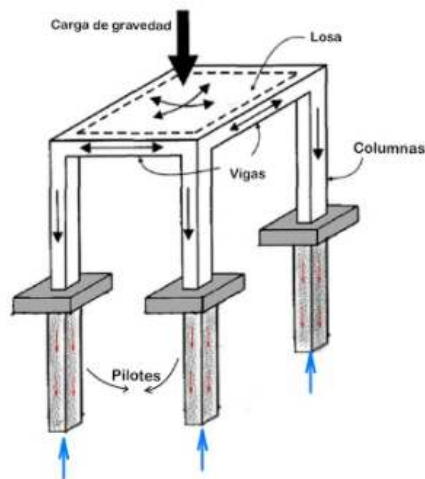


Figura 2.9 Distribución de cargas verticales de un pórtico a la cimentación.

Elaboración propia.

2.1.5.4 Cargas Horizontales

Las cargas horizontales provienen de fuerzas diferentes de las que transmite la superestructura hacia los pilotes, particularmente son generadas por fenómenos como la acción que tendrá un sismo en una estructura, la acción sísmica determina efectos como: el momento de volcamiento generado por el diagrama de corte que se desarrolla a lo largo de las edificaciones, las fuerzas horizontales afectarán a la fundación por pilotaje tal como se puede apreciar en la Figura 2.10. Otro caso en el que se presentan las solicitaciones horizontales en pilotes se debe a la aplicación de sobrecargas al momento de construir una edificación con zapatas en un plano adyacente al pilote.

Los empujes horizontales derivados por las presiones de viento y las fuerzas de corriente de agua también generan interacción de fuerzas horizontales en la cimentación.

Cabe señalar que las cargas laterales sobre los pilotes varían durante el proceso de movimiento del suelo. La fuerza de reacción o fuerza impulsora sobre el pilote depende del desplazamiento relativo entre el pilote y el suelo. Una vez que los movimientos de suelo exceden la deflexión del pilote, causarán fuerzas impulsoras en el eje del pilote.

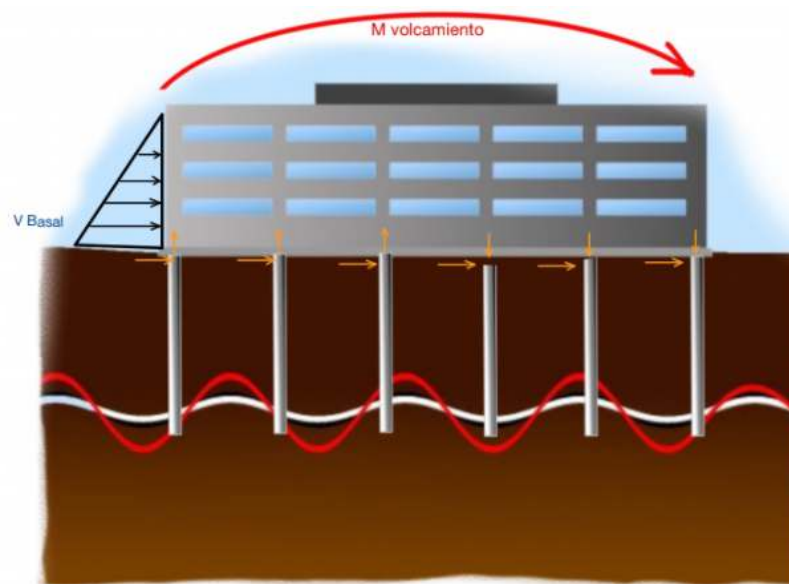


Figura 2.10. Esquema de cargas horizontales por la acción sísmica.

Elaboración propia.

2.1.6 Comportamiento de Pilotes con Carga Lateral.

El comportamiento del pilote ante cargas laterales es un estudio clásico de la interpretación suelo-cimentación, el problema con la carga lateral en cimentaciones tipo pilote es cómo se presentará esta interacción, tal es el caso de la carga horizontal en la punta del pilote que se muestra en la Figura 2.11 (a), o la carga horizontal del suelo circundante Figura 2.11 (b), en el apartado 2.1.3 se mencionó a los pilotes de punta, pilotes flotantes y una combinación de ambos, igualmente en esta clasificación hay que considerar las cargas horizontales.

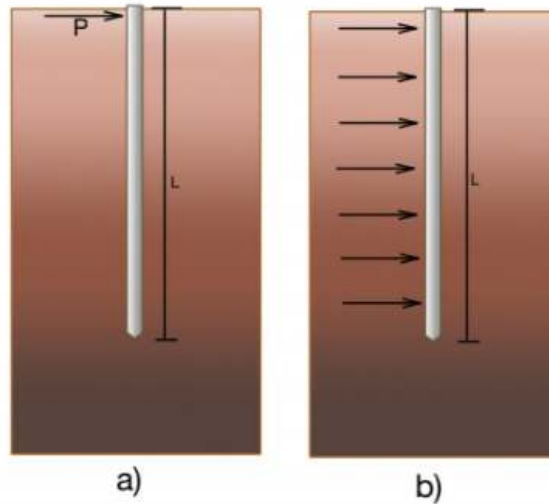


Figura 2.11 Tipos de Carga Lateral.

Elaboración propia

Finalmente, la condición de apoyo en la cabeza (Figura 2.12) se presenta como libre y empotrada. Si a todo esto se le suma la forma que se va a instalar el pilote, la cota de los niveles freáticos el problema se torna mucho más extenso y difícil de normalizar.

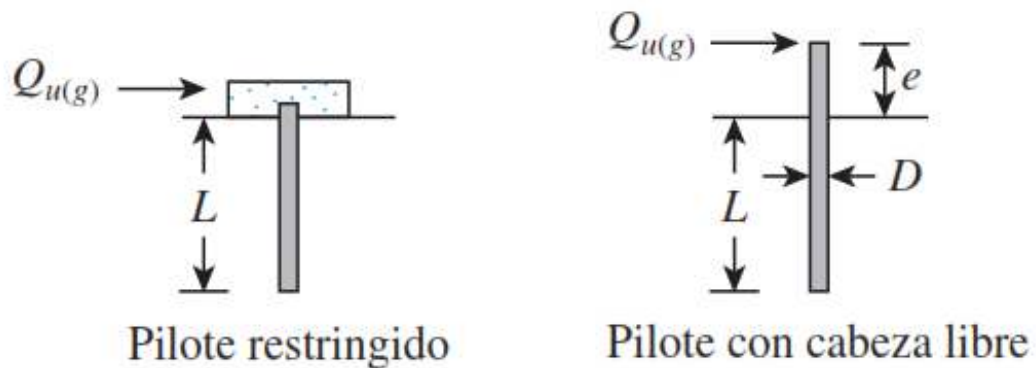


Figura 2.12 Pilotes restringido - Pilotes con cabeza libre.

Tomado de (Braja M. Das, 2011)

En todo caso, ante todas estas premisas el producto final es la capacidad de carga del pilote y la deformación admisible que los investigadores se encargaron de relacionar entre sí.

2.1.6.1 Cargas Laterales en Pilotes

La carga lateral produce en un pilote vertical deformaciones que cumplen con la ecuación diferencial de una viga con carga distribuida, con esta hipótesis el pilote se trata como una viga apoyada en un medio continuo.

Los pilotes cargados lateralmente se comportan como una columna enterrada bajo la presencia de cargas verticales, momentos o cargas laterales actuando como una condición de flexocompresión, además de forma conjunta con cargas axiales de manera tal que la ecuación (2.1.1) modela este comportamiento, sin embargo varios investigadores han dejado simplificado y permiten determinar a partir de la ecuación diferencial anterior, valores de cortante ecuación (2.1.2), valores de momento ecuación (2.1.3) y la pendiente de la curva de deformación del pilote ecuación (2.1.4). Se puede evidenciar el comportamiento elástico lateral del pilote y permite entender qué ocurre, no sólo con el pilote sino con el terreno alrededor, porque cuando se analiza una condición de carga lateral no es sólo entender el diseño estructural del pilote sino lo que está ocurriendo en el suelo circundante.

$$EI \left(\frac{d^4 y}{dx^4} \right) + Q \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right) + E_s y = 0 \quad (2.1.1)$$

Donde:

EI= Rigidez a la flexión del pilote

Es= Módulo de elasticidad secante de la curva de respuesta del suelo

Q=Carga axial en el pilote

y= Deflexión lateral del pilote

$$V = EI \left(\frac{d^3 y}{dx^3} \right) + Q \left(\frac{dy}{dx} \right) \quad (2.1.2)$$

$$M = EI \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right) \quad (2.1.3)$$

$$S = \frac{dy}{dx} \quad (2.1.4)$$

En la Figura 2.13, se aprecia el desplazamiento la deformación **y**, la pendiente de dicha deformación **S**, el momento flector **M**, el cortante **V** y la presión que se genera sobre el terreno **P**. Se nota puntos de inflexión en la gráfica a razón de que el pilote tiene esta condición de carga lateral con tal momento, por lo tanto, estaría generando un cortante bastante alto en el extremo, sin embargo aparece un punto de inflexión en el cortante, que determina el momento máximo sobre el pilote, de igual forma se estaría generando una presión de contacto bastante alta en la superficie, donde el estudio geotécnico deberá cuantificar los valores de presión admisible que soportaría el terreno debido a la deformación del pilote.

Estos criterios se deben tomar en cuenta en estructuras con pilotes en donde se diseña considerando cargas laterales, móviles de impacto, o una edificación donde se les suministre mucha responsabilidad al pilote debido a efectos laterales por cargas sísmicas. No solo debemos entender el diseño estructural, de igual manera se debe analizar, el comportamiento que ocurre alrededor del sistema de fundación.

Para esto hay que tener claro que la respuesta del suelo ante una carga lateral cualquiera es un comportamiento no lineal, y para el análisis se conceptualiza una simplificación para poder llegar a métodos de cálculo mucho más sencillos.

Otra premisa es que el Módulo de Elasticidad del suelo no es constante con la profundidad, es muy importante tal criterio porque el especialista geotécnico debe diseñar en función de la variación del Módulo de la Elasticidad que experimenta el terreno con la profundidad.

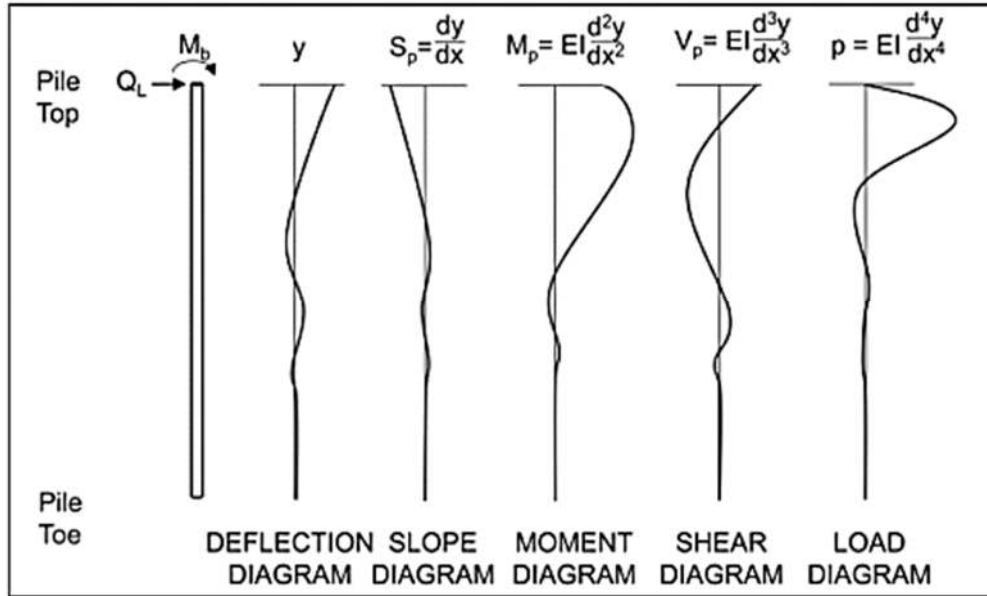


Figura 2.13 Representación Gráfica de resultados LPILE (Reese, 2000)

A lo largo del estudio de pilotes cargados lateralmente surgen metodologías que permiten calcular el desplazamiento admisible en función de una sollicitación lateral. Las metodologías permitirán realmente entender cómo es el comportamiento esfuerzo-deformación de un pilote.

3 CAPÍTULO III Métodos de Cálculo

3.1 Teoría de Elasticidad

La representación elástica que propone esta teoría es un modelo de suelo a través de un medio continuo, la interpretación permite la transmisión de fuerzas y la aplicación de parámetros geotécnicos en el cálculo.

(Manual de Carreteras de Chile "Instrucciones y Criterios de Diseño", 2017) afirma que "Los pilotes sometidos a solicitaciones horizontales y de momento aplicadas en sus cabezas se tratarán como vigas en un medio elástico" (pág. 1388) puesto que la resistencia lateral de suelo comienza en el estrato inicial.

El manual indica diagramas para determinar desplazamiento, momento y corte por medio de ecuaciones:

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{f e q}} \quad (3.1.1)$$

$$E_o = f e q Z \quad (3.1.2)$$

E_p = Módulo de formación del pilote

E_o = Módulo de deformación del suelo

Z = Espesor del suelo competente

I_p = Momento de Inercia de la sección del pilote con respecto al eje perpendicular al plano de cargas.

L_p = Longitud del pilote

D = Diámetro o lado que se desplaza

$f e q$ = Coeficiente que representa el incremento lineal con la profundidad del módulo de deformación del estrato portante y se determina por la siguiente expresión.

$$f e q = f \left(1 + 0.5 \frac{d_s}{D} \right) \quad (3.1.3)$$

f= factor de carga sísmica se determina por la siguiente tabla en la Figura 3.1

ds= Espesor del suelo entre la superficie original del terreno y el inicio del estrato portante.

FACTOR DE RIGIDEZ SISMICA PARA FUNDACIONES PROFUNDAS

Tipo de suelo	Factor de rigidez sísmica, F_r	
	Multiplica a f_{eg}	Multiplica a E_p
Gravas arenosas	1,6 a 2,2	1,3 a 1,6
Arenas	0,7 a 1,0	0,8 a 1,0
Suelos finos parcialmente saturados	0,7 a 1,0	0,8 a 1,0
Suelos finos saturados	1,0* a 3,2*	1,0* a 2,0*

* Valor inferior si el módulo de deformación para sollicitación estática se determina con la deformación no drenada del suelo.
 Valor superior si el módulo se determina con la deformación del suelo que incluye la deformación no drenada más la deformación por consolidación

Figura 3.1 Factores de Rigidez Sísmica para Pilotes

Tomado de (Manual de Carreteras de Chile "Instrucciones y Criterios de Diseño", 2017)

3.1.1 Capacidad de Soporte Lateral del Suelo

La capacidad portante del estrato σ_{hp} en una profundidad estimada se calcula por medio de la ecuación (3.1.4).

$$\sigma_{hp} = 3(\sigma_v Kp + 2C \sqrt{Kp}) \quad (3.1.4)$$

σ_v = Esfuerzo efectivo

C= Cohesión del estrato

ϕ = Ángulo de fricción

$$Kp = \frac{1 + \text{sen}\phi}{1 - \text{sen}\phi}$$

σ_{hz} = Tensión horizontal entre el suelo y el pilote

El manual de carreteras de Chile sugiere realizar una relación entre la capacidad portante del suelo con la tensión horizontal entre el suelo y el pilote, tal relación no debe ser mayor a 1.5 en sollicitaciones estáticas y 1.3 para sollicitaciones dinámicas.

Cargas Estáticas $\frac{\sigma_{hp}}{\sigma_{hz}} \geq 1.5$

Cargas Dinámicas $\frac{\sigma_{hp}}{\sigma_{hz}} \geq 1.3$

3.1.2 Coeficientes en Suelos con Rigidez Variable en Profundidad.

3.1.2.1 Pilotes con Cabeza Libre

Se puede determinar coeficientes para la carga lateral, momento flector y desplazamiento del pilote con cabeza libre por medio de la ecuación (3.1.1), la profundidad medida a partir del inicio del suelo colaborante Z y la longitud del pilote L_p .

Las siguientes graficas permiten determinar el coeficiente de desplazamiento F_δ , momento F_M y corte F_V .

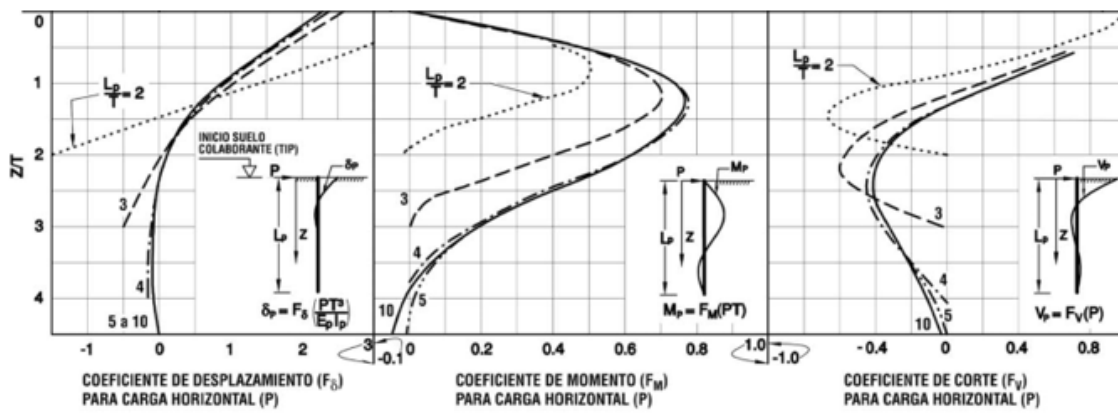


Figura 3.2 Coeficientes de suelos con rigidez variables

Tomado de (Manual de Carreteras de Chile "Instrucciones y Criterios de Diseño", 2017)

Ecuaciones:

$$\delta_p = F_\delta \left(\frac{P T^3}{E_p I_p} \right) \quad (3.1.5)$$

$$M_p = F_M (P T) \quad (3.1.6)$$

$$V_p = F_V P \quad (3.1.7)$$

P =Carga horizontal

δ_p =Desplazamiento debido a la carga horizontal

M_p =Momento debido a la carga horizontal

V_p =Corte debido a la carga horizontal.

3.1.2.2 Pilotes con Cabeza Restringida

Para determinar el coeficiente de desplazamiento F_{δ} y de momento F_M para pilotes con cabeza empotrada, se utilizarán las ecuaciones (3.1.5) y (3.1.6) respectivamente.

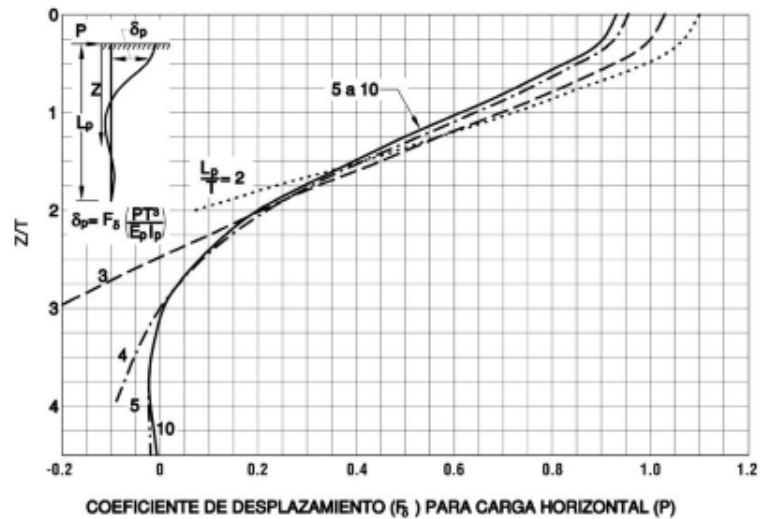


Figura 3.3 Coeficiente de Desplazamiento.

Tomado de (Manual de Carreteras de Chile "Instrucciones y Criterios de Diseño", 2017)

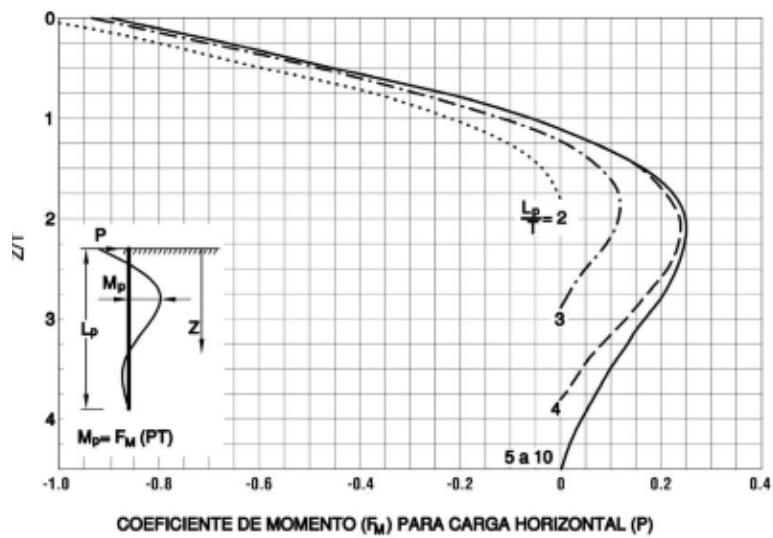


Figura 3.4 Coeficiente de Momento

Tomado de (Manual de Carreteras de Chile "Instrucciones y Criterios de Diseño", 2017)

3.1.3 Coeficientes en Suelos con Módulo de Deformación Constante en Profundidad.

3.1.3.1 Pilotes con Cabeza Libre

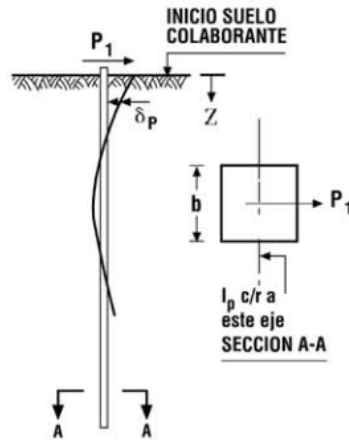


Figura 3.5 Esquema de un pilote con cabeza libre

Tomado de (Manual de Carreteras de Chile "Instrucciones y Criterios de Diseño", 2017)

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k_H D}{4 E_p I_p}} \text{ en } [1/m] \quad (3.1.8)$$

$$k_H = \frac{0.9 E_o}{D} \quad (3.1.9)$$

k_H = Constante de Balasto

Z = Profundidad medida a partir del inicio del suelo colaborante.

Ecuaciones para el cálculo de Desplazamiento, Momento Flector y Cortante:

Desplazamiento lateral a lo largo del pilote por la acción de una sollicitación lateral.

$$\delta_p = -\frac{2 P_1 \lambda}{k_H D} (e^{-\lambda Z} (\cos \lambda Z)) \quad (3.1.10)$$

Momento flector a lo largo del pilote.

$$M = \frac{P_1}{\lambda} (e^{-\lambda Z} (\text{sen}\lambda Z)) \quad (3.1.11)$$

Esfuerzo de Corte a lo largo del pilote.

$$V = P_1 (e^{-\lambda Z} (\text{cos}\lambda Z - \text{sen}\lambda Z)) \quad (3.1.12)$$

3.1.3.2 Pilotes con Cabeza Restringida

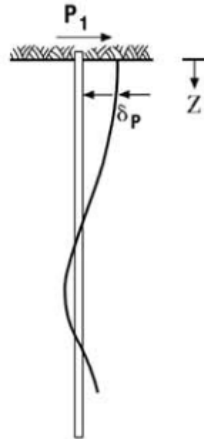


Figura 3.6 Esquema de un pilote empotrado en su cabeza

Tomada de (Manual de Carreteras de Chile "Instrucciones y Criterios de Diseño", 2017)

Factores adimensionales para las ecuaciones de pilotes con cabeza restringida.

$$A_{\lambda Z} = e^{-\lambda Z} (\text{cos}\lambda Z + \text{sen}\lambda Z) \quad (3.1.13)$$

$$B_{\lambda Z} = (e^{-\lambda Z} (\text{sen}\lambda Z)) \quad (3.1.14)$$

$$C_{\lambda Z} = (e^{-\lambda Z} (\text{cos}\lambda Z - \text{sen}\lambda Z)) \quad (3.1.15)$$

$$D_{\lambda Z} = (e^{-\lambda Z} (\text{cos}\lambda Z)) \quad (3.1.16)$$

Ecuaciones para el cálculo de Desplazamiento, Momento Flector y Cortante:

Desplazamiento lateral a lo largo del pilote por la acción de una sollicitación lateral.

$$\delta_P = \frac{P_1 \lambda}{k_H D} \left(2D_{\lambda Z} - \frac{A_{\lambda Z} C_{\lambda Z}}{D_{\lambda Z}} \right) \quad (3.1.17)$$

Momento flector a lo largo del pilote.

$$M = \frac{P_1}{\lambda} \left(B_{\lambda Z} - 0.5 \left(\frac{A_{\lambda Z}^2}{D_{\lambda Z}} \right) \right) \quad (3.1.18)$$

Esfuerzo de Corte a lo largo del pilote.

$$V = P_1 \left(C_{\lambda Z} + \frac{A_{\lambda Z} B_{\lambda Z}}{D_{\lambda Z}} \right) \quad (3.1.19)$$

3.2 Método de Broms

En el marco de las soluciones usadas para el cálculo de pilotes cargados lateralmente, (Broms B. , 1964) desarrolló un método para determinar el momento y el desplazamiento, utilizando la teoría del coeficiente de balasto, para pilotes en suelos cohesivos y suelos friccionantes.

Investigaciones anteriores afirman:

Para el desarrollo del método de cálculo de la resistencia última del suelo Q_{uL} , Broms introdujo unas simplificaciones a la forma como se distribuyen las presiones de reacción del suelo a lo largo del pilote, según las condiciones presentes en la cabeza del pilote: pilotes no restringidos (de cabeza libre) y pilotes restringidos (de cabeza fija impedida de girar o cabeza empotrada). Además, consideró de manera separada suelos friccionantes y suelos cohesivos, aplicando el concepto de pilotes cortos y pilotes largos. Los primeros, dependientes de la resistencia del suelo, y los últimos, del momento de fluencia del elemento estructural M_y ecuación(3.2.10). (Salamanca Medina & Abril González , 2017, pág. 74).

A continuación, se muestra en la Figura 3.7 Los mecanismos de falla ante una sollicitación lateral que (Broms B. , 1964) establece para su teoría.

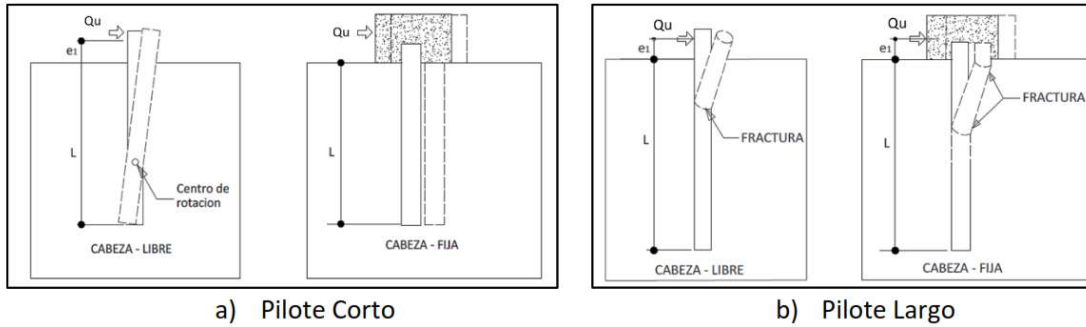


Figura 3.7 Mecanismo de falla de pilotes con carga lateral.

Tomado de (Broms B. , 1964)

3.2.1 Suelos Cohesivos

3.2.1.1 Pilotes Cortos de Cabeza Libre

La capacidad a esfuerzos laterales de los pilotes cortos obedece a la resistencia del suelo. En la Figura 3.8, se muestra a detalle el mecanismo de falla que puede tener un pilote corto.

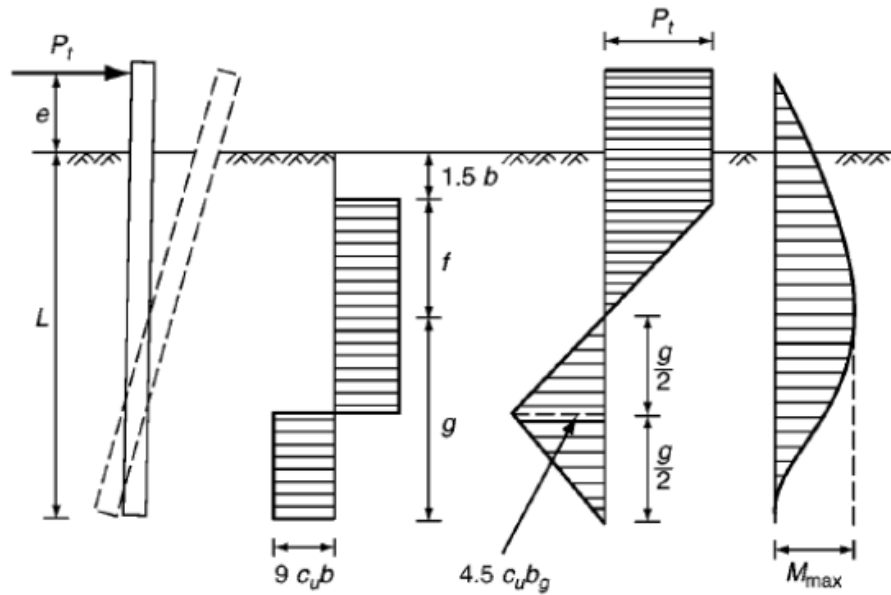


Figura 3.8 Pilote corto aislado, sin restricción a la rotación en suelo cohesivo.

Tomado de (Broms B. , Lateral resistance of piles in cohesionless soils. Journal of the soils mechanics and foundations division. [Fotografía], 1964)

Para determinar si un pilote es corto en suelos cohesivos deberá cumplir la siguiente condición:

$$\beta < 2.0$$

Donde β es un parámetro adimensional que se determina por la ecuación:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K D}{4Eplp}} \quad (3.2.1)$$

K= Presión / Desplazamiento [kN/m]

D= Diámetro del pilote

Ep= Módulo de elasticidad del pilote

lp= Momento de inercia de la sección del pilote

En la Figura 3.8 se muestra los diagramas de momento, esfuerzo cortante, resistencia del estrato y el desplazamiento en un pilote corto sin restricción.

El diagrama de corte muestra la distancia del punto de inflexión que se determina con la ecuación (3.2.2)

$$f = \frac{Pt}{9CuD} \quad (3.2.2)$$

Integrando la parte superior e inferior del diagrama de corte en el punto de inflexión, se obtiene el momento positivo máximo respectivamente:

$$M_{max}^+ = Pt(e + 1.5D + 0.5f) \quad (3.2.3)$$

$$M_{max} = 2.5Dg^2Cu \quad (3.2.4)$$

Pt= Carga Última

Cu= Cohesión no drenada

L= Longitud del pilote

g= Dilatancia debajo del momento máximo a flexión

Por lo tanto, la longitud del pilote es:

$$L = 1.5D + f + g \quad (3.2.5)$$

Para que se cumplan estas consideraciones el Momento Flector Máximo corresponde a M_{\max} , sin embargo, este debe ser menor al Momento de Fluencia M_y . (Broms B. , 1964) Plantea que la falla del elemento es producto de la rotación del pilote.

3.2.1.1 Desplazamiento Lateral

$$\delta = \frac{4 P (1 + 1.5 \frac{e}{L})}{k D L} \quad (3.2.6)$$

3.2.1.2 Pilotes Cortos de Cabeza Restringida

En los pilotes donde su cabeza es restringida, el posible mecanismo de falla es el que se muestra en la Figura 3.9, toma lugar cuando la carga lateral actuante es igual a la resistencia lateral última. El momento generado por la rotación del pilote tiende a cero a medida que la profundidad se acerque a la punta.

(Broms B. , 1964) se basa en el equilibrio de fuerzas para formular de forma simplificada las siguientes ecuaciones:

$$P = 9 C_u D (L - 1.5D) \quad (3.2.7)$$

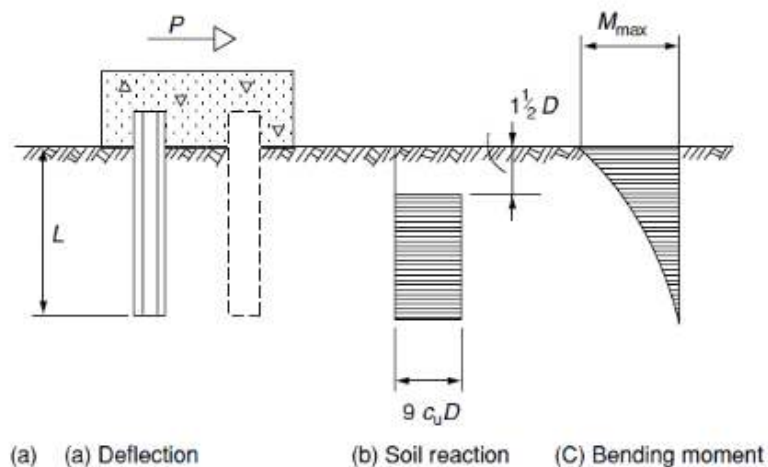


Figura 3.9 Mecanismo de falla de un pilote corto restringido en suelo cohesivo.

Tomado de (Broms B. , Lateral resistance of piles in cohesionless soils. Journal of the soils mechanics and foundations division. [Fotografía], 1964)

En la Figura 3.9 se muestra las supuestas distribuciones de la reacción del suelo junto con el diagrama de momento. Para que el pilote falle de esta manera el momento de fluencia M_y debe ser igual o mayor al momento máximo negativo.

$$M_y \geq M_{max}^{neg}$$

$$M_y \geq P(0.5L + 0.75D) \quad (3.2.8)$$

(Broms B. , 1964) Introduce graficas en función a parámetros adimensionales L/D vs Pu/CuD^2 , que permiten calcular la resistencia a carga última $Qu=Pu$ de un pilote corto con restricción o sin restricción en la cabeza.

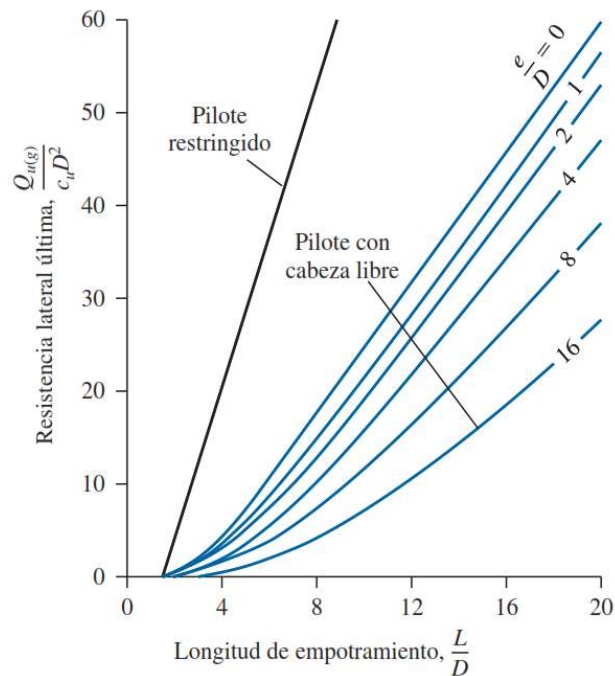


Figura 3.10 Solución de Broms para la resistencia lateral ultima de pilotes cortos en cohesivos.

Tomado de (Braja M. Das, 2011)

3.2.1.2.1 Desplazamiento Lateral

$$\delta = \frac{P}{k D L} \quad (3.2.9)$$

3.2.1.3 Pilotes Largos de Cabeza Libre

Para determinar si un pilote es largo en suelos cohesivos deberá cumplir la siguiente condición:

$$\beta L > 2.5$$

La capacidad a esfuerzos laterales de los pilotes largos depende principalmente del momento de fluencia del elemento estructural M_y que será igual al Momento Máximo. El posible mecanismo de falla se indica en la Figura 3.11.

$$M_y = S * F_y \quad (3.2.10)$$

S= Módulo de sección del pilote

F_y= Esfuerzo de fluencia del material del pilote

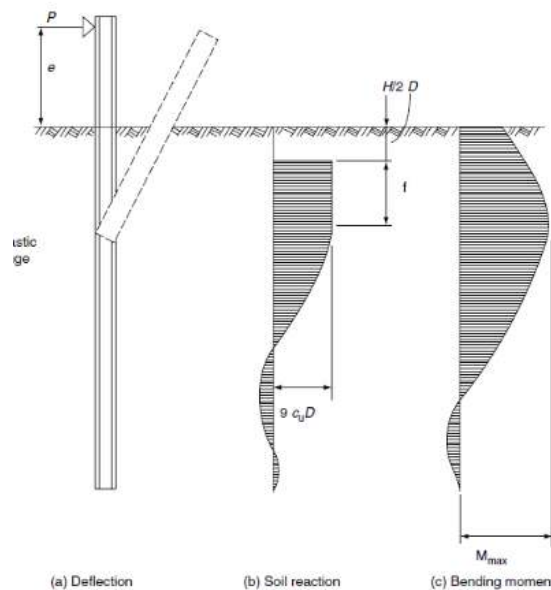


Figura 3.11. Mecanismo de falla de un pilote largo libre en suelo cohesivo.

Tomado de (Broms B. , 1964)

A razón de que se aumenta el largo del pilote sin restricción se formaran zonas de rotura, dichas zonas señalan el momento máximo. (Broms B. , 1964) estima que este punto estará a $1.5D+f$. Por lo tanto, el momento máximo se calcula con la ecuación (3.2.3).

3.2.1.3.1 Desplazamiento Lateral

$$\delta = \frac{2 P \beta (e \beta + 1)}{k D} \quad (3.2.11)$$

3.2.1.4 Pilotes de Longitud Intermedia con Cabeza Restringida

En el caso de los pilotes de longitud intermedia empotrados en el extremo superior, la zona de rotura se ubica en la cabeza del pilote, tal punto genera un momento flector que será igual al momento de fluencia calculado por la ecuación (3.2.10).

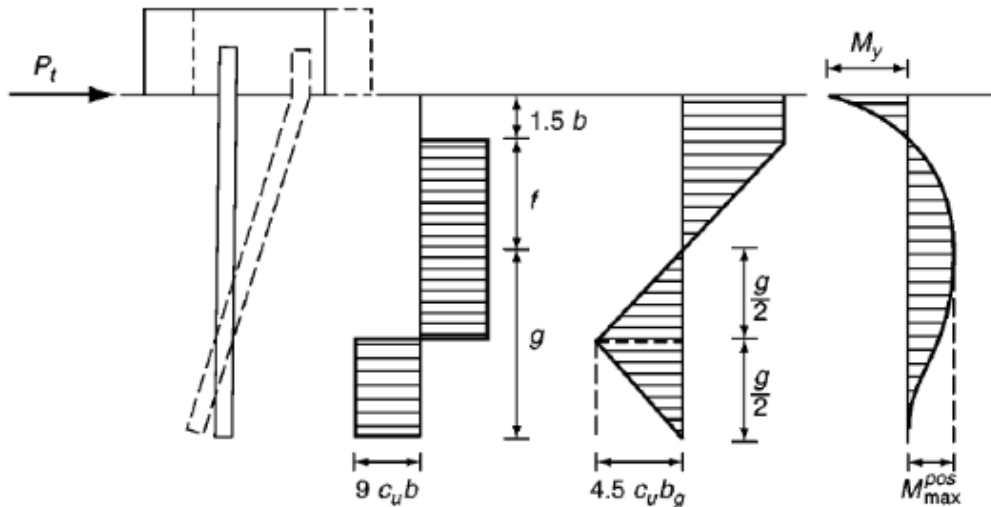


Figura 3.12 Mecanismo de falla de pilotes intermedios en suelos cohesivos.

Tomado de (Broms B. , 1964)

(Broms B. , 1964) realiza el equilibrio de momentos en el punto de la inflexión en el diagrama de corte $V=0$, donde marca el máximo momento positivo.

$$M_{Max}^+ = Pt(1.5D + f) - My - \frac{9CuDf^2}{2} \quad (3.2.12)$$

Sustituyendo f en la ecuación (3.2.12) obtenemos:

$$M_{Max}^+ = Pt(1.5D + 0.5f) - My \quad (3.2.13)$$

Aplicando la sumatoria de momentos con el diagrama de corte para la parte inferior.

$$M_{Max}^+ = 2.5 C_u D g^2 \quad (3.2.14)$$

La longitud de pilote se calcula con la ecuación (3.2.5)

3.2.1.5 Pilotes Largos de Cabeza Restringida

El análisis que establece (Broms B. , 1964) para pilotes largos de cabeza restringida muestra: dos posibles puntos de rotura en el pilote, la primera en la cabeza del pilote y la segunda en el punto de inflexión del diagrama de corte, dicho en otras palabras, la rotura se da en el punto donde está el valor máximo positivo de momento.

Es justamente en ese punto donde el momento máximo positivo es igual al momento máximo calculado por la ecuación (3.2.10).

Por lo tanto, la carga última se determina por:

$$P = \frac{2M_y}{(1.5D + 0.5f)} \quad (3.2.15)$$

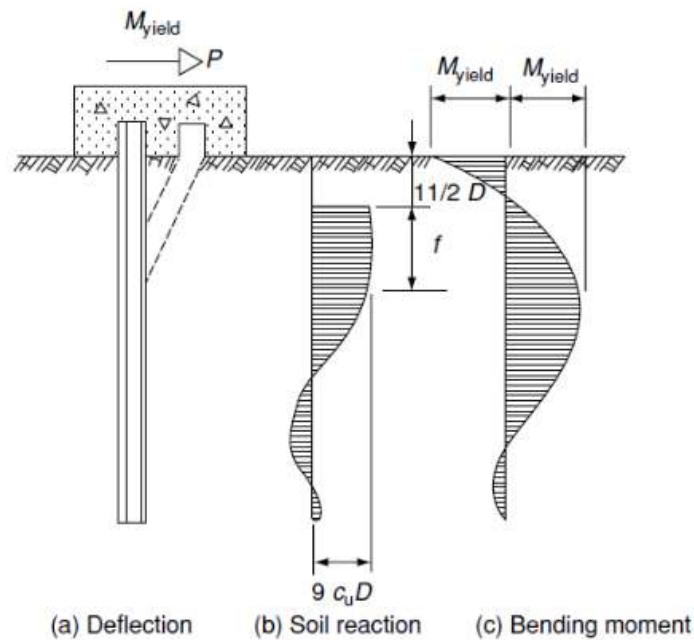


Figura 3.13 Mecanismo de falla de un pilote largo restringido en suelo cohesivo.

Tomado de (Broms B. , 1964)

Juntamente con las ecuaciones para el cálculo de cargas laterales en pilotes (Broms B. , 1964) establece diagramas con los cuales podemos calcular la carga.

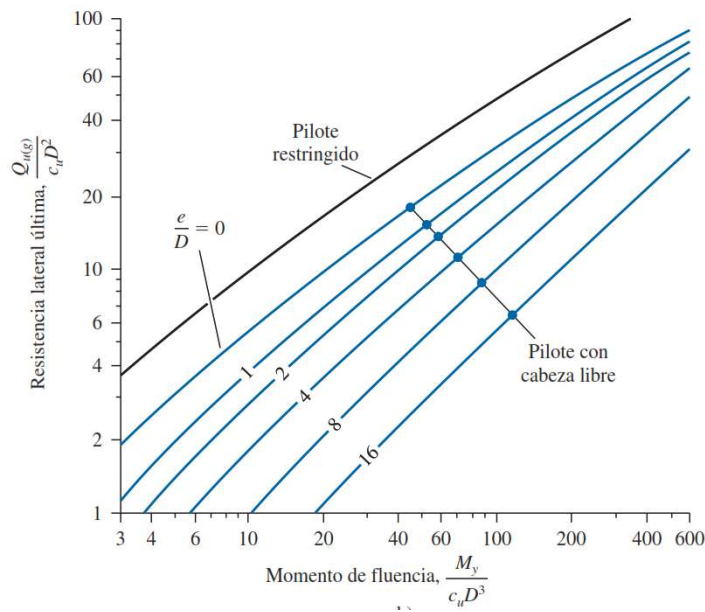


Figura 3.14. Solución de Broms para la resistencia lateral última de pilotes largos en suelos cohesivos.

Tomado de (Braja M. Das, 2011)

De la misma manera por medio de parámetros adimensionales de $\mathbf{My/CuD^3}$ vs $\mathbf{Pu/CuD^2}$ permiten calcular la resistencia a carga última $\mathbf{Qu=Pu}$ de un pilote largos sin restricción.

3.2.1.5.1 Desplazamiento Lateral

$$\delta = \frac{P \beta}{k D} \quad (3.2.16)$$

3.2.2 Suelos No Cohesivos

En el análisis realizado por (Broms B. , 1964) para cimentaciones piloteadas en suelos no cohesivos, en primer lugar, indica que se puede presentar dos tipos de falla: la primera en el estrato y la segunda por formación de puntos de rotura en el pilote.

(Broms B. , 1964) simplifica la resistencia máxima del suelo \mathbf{Pp} como tres veces la presión pasiva de Rankine.

$$Pp = 3\sigma'_v kp \quad (3.2.17)$$

Donde:

$$\sigma'_v = \gamma z \quad (3.2.18)$$

$$kp = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (3.2.19)$$

σ'_v = Esfuerzo efectivo

Kp = Coeficiente de presión pasiva de Rankine

ϕ = Ángulo de fricción

3.2.2.1 Pilotes Cortos de Cabeza Libre

Para determinar si un pilote es corto en suelos no cohesivos se deberá cumplir la siguiente condición:

$$\eta < 2.0$$

ηh = Constante de módulo de reacción del suelo

Ep = Módulo de elasticidad del pilote

Ip = Momento de inercia de la sección del pilote

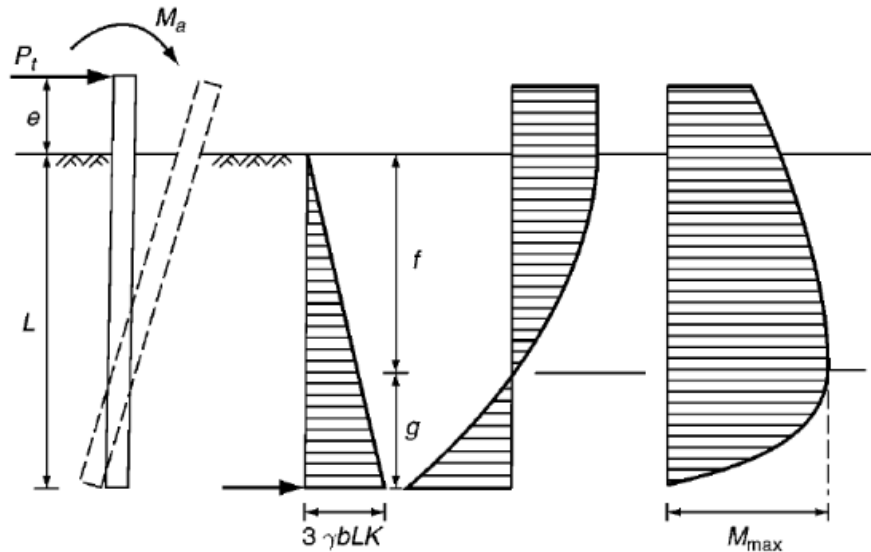


Figura 3.15 Modos de fallo de pilotes cortos de cabeza libre en suelos no cohesivos.

Tomado de (Broms B. , 1964)

Debido que no tienen restricción a la rotación, la falla se producirá en el estrato. En la Figura 3.15 se muestra como varía la curva de reacción del suelo mientras más se acerca a la punta. La condición a la que están sujetos este tipo de pilotes para que se consideren cortos es: si el momento máximo es menor al momento cercano a la punta. Otra consideración, es que los esfuerzos que actúan cercanos al extremo inferior del pilote se deben sustituir por una carga concentrada en la punta.

Se realiza el equilibrio de fuerzas en la punta del pilote y obtendremos:

$$M_t + P_t(e + L) = (3 \gamma D L k_p) \left(\frac{L}{3}\right) \left(\frac{L}{2}\right) \quad (3.2.20)$$

Por la forma que falla el pilote, para resolver la ecuación se puede asumir que P_t y M_t son iguales a cero. Entonces se obtiene los valores de carga y momento en el pilote.

$$P_t=0$$

$$P_t = \frac{k_p D L^3 \gamma}{2(e + L)} \quad (3.2.21)$$

$$M_t=0$$

$$M_t = 0.5 \gamma D L^3 k_p \quad (3.2.22)$$

Para calcular el momento máximo a una profundidad f se ubica el punto de inflexión del cortante $V=0$.

$$Pt - (3 \gamma D L k_p)(0.5f) = 0 \quad (3.2.23)$$

$$f = 0.82 \left(\frac{Pt}{\gamma D k_p} \right) \quad (3.2.24)$$

El momento máximo se dará en una profundidad f .

$$M_{max}^+ = P_t(e + L) + M_t - 0.5(\gamma D f^3 k_p) \quad (3.2.25)$$

(Broms B. , 1964) Presenta curvas para simplificar los cálculos de este tipo de pilotes como alternativa práctica para la obtención de cargas laterales actuantes.

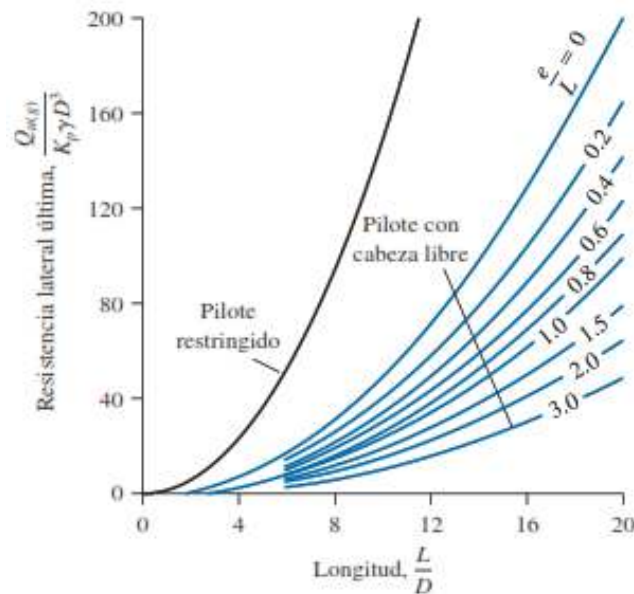


Figura 3.16 Solución de Broms para la resistencia lateral última de pilotes cortos en suelos no cohesivos.

Tomado de (Braja M. Das, 2011)

3.2.2.1.1 Desplazamiento Lateral

$$\delta = \frac{18 P \left(1 + 1.33 \frac{e}{L} \right)}{L^2 \eta_h} \quad (3.2.26)$$

3.2.2.2 Pilotes Cortos de Cabeza Restringida

El modo de falla que presenta los pilotes cortos con cabeza empotrada es la traslación horizontal del pilote dada por una carga actuante. El modo de fallo dependerá de la longitud del pilote debido a que tiene la rotación restringida en la cabeza, Figura 3.17.

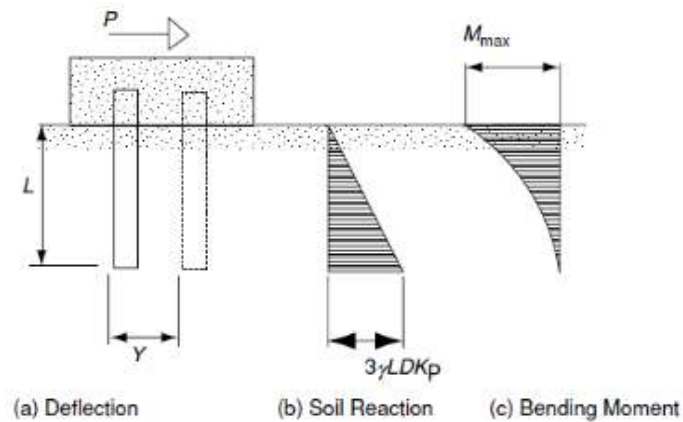


Figura 3.17 Mecanismo de falla de un pilote corto restringido en suelo no cohesivo.

Tomado de (Broms B. , 1964)

El cálculo de la resistencia última se puede determinar mediante el equilibrio de fuerzas en el fondo de la cimentación.

$$Pt_u = \frac{My}{L} + (0.5 \gamma D L^2 kp) \quad (3.2.27)$$

3.2.2.2.1 Desplazamiento Lateral

$$\delta = \frac{2P}{L^2 \eta_h} \quad (3.2.28)$$

3.2.2.3 Pilotes Largos de Cabeza Libre

Para determinar si un pilote es largo en suelos no cohesivos se deberá cumplir la siguiente condición:

$$\eta > 4.0$$

Donde η es un parámetro adimensional que se determina por:

$$\eta = \sqrt[5]{\frac{\eta h}{Eplp}} \quad (3.2.29)$$

Los pilotes largos de cabeza libre en suelos donde la cohesión no existe el modo de fallo o de rotura se generará a una distancia **f** del suelo.

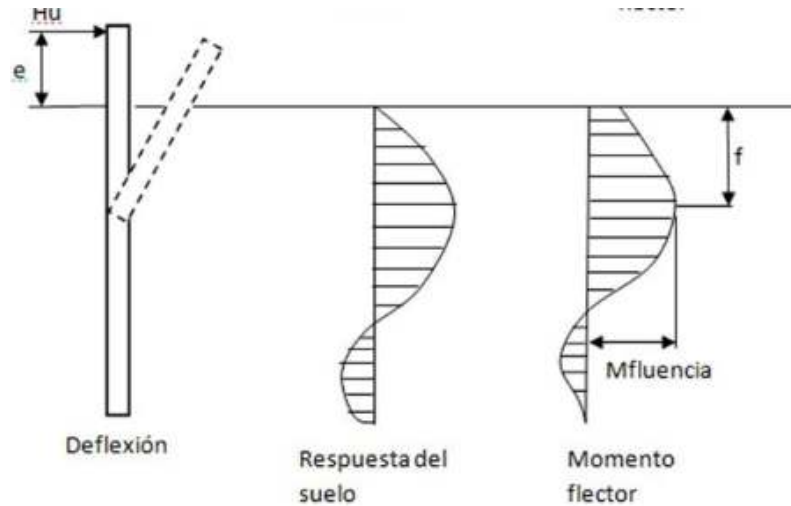


Figura 3.18 Mecanismo de falla de un pilote largo libre en suelo no cohesivo.

Tomado de (Broms B. , 1964)

La falla o rotura se establece cuando el momento de fluencia **My** es igual al momento flector máximo.

$$Pt_u = \frac{My}{e + 0.544 \left(\frac{Pt}{\gamma D kp} \right)^{1/2}} \quad (3.2.30)$$

3.2.2.3.1 Desplazamiento Lateral

$$\delta = \frac{2.40 P}{\eta_h^{\frac{3}{5}} (EI)^{\frac{2}{5}}} \quad (3.2.31)$$

3.2.2.4 Pilotes Largos de Cabeza Restringida

La consideración para este caso es que el momento máximo positivo y negativo será igual al momento de fluencia **My**. (Broms B. , 1964) indica que el momento máximo

positivo se ubicará a una profundidad f , además se desarrolla una resistencia pasiva del sustrato por encima de esta sección.

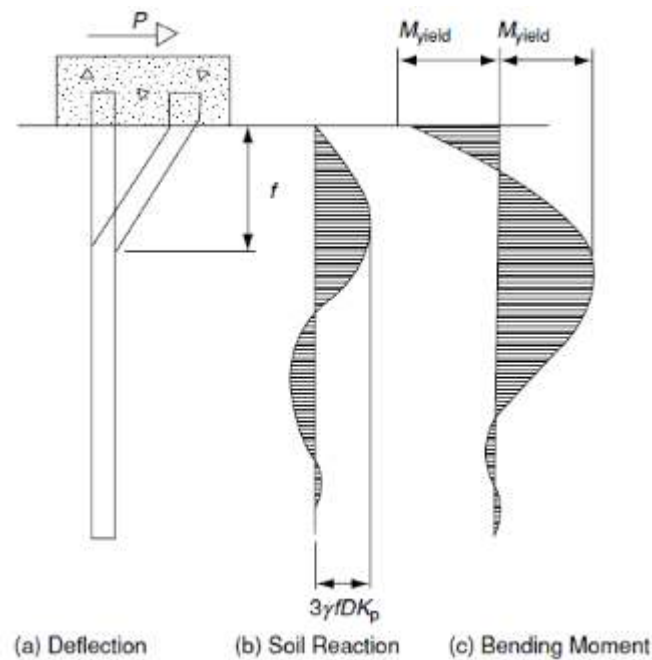


Figura 3.19 Mecanismo de falla de un pilote largo restringido en suelo no cohesivo.

Tomado de (Broms B. , 1964)

La resistencia lateral última del pilote se calcula mediante:

$$Pt_u = \frac{2My}{e + 0.54 \sqrt{\frac{P}{\gamma D k_p}}} \quad (3.2.32)$$

(Broms B. , 1964) establece curvas para simplificar los cálculos de este tipo de pilotes como alternativa práctica con el fin de obtener la carga lateral actuante (Figura 3.20).

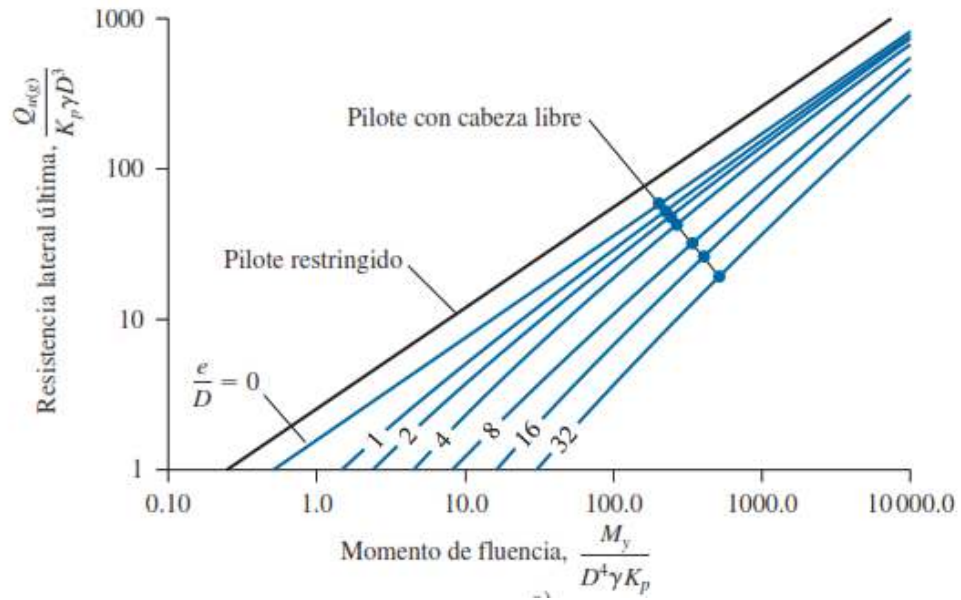


Figura 3.20 Solución de Broms para la resistencia lateral última de pilotes largos en suelos cohesivos.
Tomado de (Braja M. Das, 2011).

3.2.2.4.1 Desplazamiento Lateral

$$\delta = \frac{0.93 P}{\eta_h^{3/5} (EI)^{2/5}} \quad (3.2.33)$$

3.3 Modelos P-Y

Las cargas laterales en los pilotes generan esfuerzos P en el terreno, estos esfuerzos generados en el diámetro o ancho del pilote ocasionan un desplazamiento lateral del pilote. Sainea Vargas,(2011) comenta que “La relación entre la resistencia del suelo y el desplazamiento lateral Y , a diferentes profundidades a lo largo del pilote se presenta como una sucesión de curvas. Tal representación entre el suelo y el desplazamiento de la columna estratigráfica no es lineal” (pág. 12).

Si observamos la Figura 3.21 en el pilote de sección circular actúa una carga horizontal a una profundidad Z_1 , debido a esta sollicitación corresponderá un desplazamiento y_1 , y la distribución de tensiones se asemejará al apartado “c” de la misma figura, por lo tanto, la resultante obtenida es P_1 a razón de que las presiones disminuyen en un lado del pilote y en otras están aumentando. Además se generarán esfuerzos de corte provocados por el rozamiento del terreno que ha sido desplazado y trata de moverse alrededor del pilote.

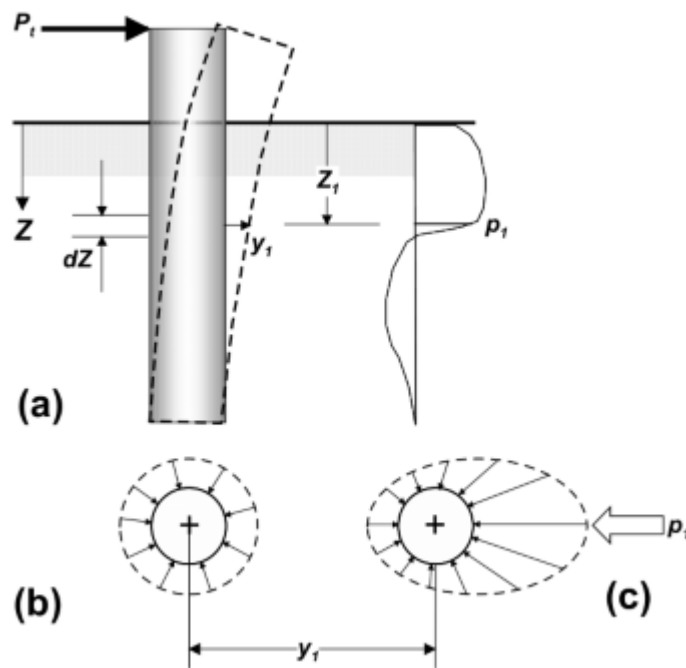


Figura 3.21 Distribución de esfuerzos alrededor del pilote

Tomada de (Hannigan P. , Globe, Likins, & Rausche, 2006)

Los modelos P-Y se establecieron en base a resultados hechos en pruebas de campo en suelos uniformes, por esta razón el método presenta dificultad, debido a que se requieren pruebas de campo para determinar el comportamiento esfuerzo-deformación del suelo en diferentes puntos de la columna estratigráfica y así graficar las curvas a lo largo del pilote.

Los modelos tradicionales de curvas P-Y desarrollados por (Matlock, 1970) y (Reese, Cox, & Koop, 1974) son modelos semiempíricos en los que la respuesta del suelo se caracteriza por estratos no lineales independientes en ubicaciones discretas.

Además, las formulaciones para estos modelos no tienen en cuenta un cambio en las propiedades del pilote, como la rigidez a la flexión del pilote, la forma de la sección transversal del pilote, la condición de apoyo en la cabeza. La interacción suelo-pilote o el comportamiento de la curva P-Y no es única, sino es una función de las propiedades del suelo y del pilote.

3.3.1 Curvas P-Y en Arcillas Blandas y Duras

El proceso de Matlock es aplicable para arcillas blandas en el cual se puede estar interactuando cargas estáticas o cargas cíclicas.

3.3.1.1 Carga Estática

En primer lugar, se obtiene el valor de la resistencia del ensayo no drenado **Cu** a una profundidad **z**, además, el peso específico γ' desde la superficie hasta la curva p - y tendrá que ser el promedio y mediante la Tabla 3.1 de los valores referenciales de ε_{50} .

Cu= Resistencia a corte en ensayo no drenado a una profundidad z

γ' = Peso específico

ε_{50} = Deformación correspondiente a la mitad de la diferencia máxima entre tensiones principales.

D= Diámetro o lado del pilote

Consistencia de la arcilla	Cu (kPa)	ϵ_{50}
Muy Blanda	<12	0.02
Blanda	12-24	0.02
Media	24-48	0.01

Tabla 3.1 Valores Referenciales de ϵ_{50}

Se determina la resistencia última del suelo por unidad de la longitud **Pu** y se considerará el valor menor de las ecuaciones (3.3.1) y (3.3.2), además se calcula la deflexión en **Y₅₀** que es la deflexión correspondiente al 50% de la resistencia última del suelo y se grafica la curva P-Y con la relación.

$$Pu = \left(3 + \frac{\gamma'}{Cu} Z + \frac{J}{D} Z \right) Cu D \quad (3.3.1)$$

$$Pu = 9Cu D \quad (3.3.2)$$

EL valor **J** toma valores de 0.5 y 0.25 para arcillas blandas y arcillas medias según (Matlock, 1970).

$$y_{50} = 2.5 (\epsilon_{50} D) \quad (3.3.3)$$

$$\frac{P}{Pu} = \frac{1}{2} \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{1/3} \quad (3.3.4)$$

$$y < 8y_{50} \quad (3.3.5)$$

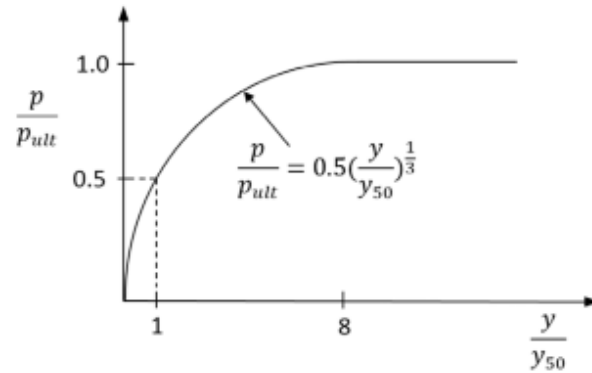


Figura 3.22 Curva P-Y para carga estática.

Tomado de (Matlock, 1970)

3.3.1.2 Carga Cíclica

La consideración para cargas cíclicas es, si la profundidad **Z** es mayor a la profundidad **Zr** en la curva P-Y, la carga tomara un valor de 70% de la resistencia última del suelo **Pu**.

$$Z_r = \frac{6 C_u D}{\gamma' D + J C_u} \quad (3.3.6)$$

Si en el caso de que **Z < Zr** los valores de la carga **P** decrecen desde **0.72Pu** en $y=3y_{50}$ hasta $y=15y_{50}$.

$$p = 0.72P_u \left(\frac{Z}{Z_r} \right) \quad (3.3.7)$$

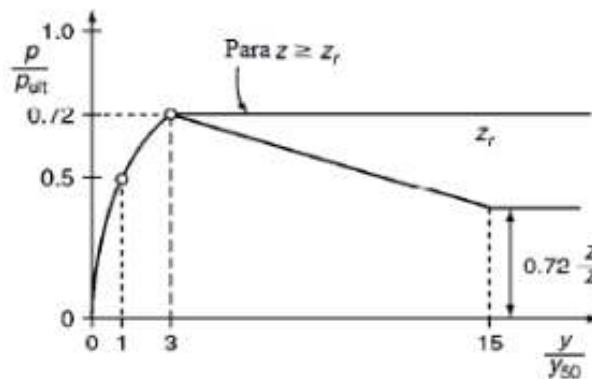


Figura 3.23 Curva P-Y para carga cíclica.

Tomado de (Matlock, 1970)

Para el cálculo de las curvas P-Y en arcillas duras se mantienen las mismas consideraciones del apartado 3.3.1 Incluyendo los parámetros k_s para definir la pendiente de la curva en función a C_a . Tabla 3.2

3.3.2 Curvas P-Y en Arcillas Duras Sumergidas

3.3.2.1 Carga Estática

Para determinar la resistencia última del suelo por unidad de la longitud P_c , en primer lugar, se obtiene el valor de la resistencia del ensayo no drenado a una profundidad z C_u , además, el peso específico γ' desde la superficie hasta la curva p-y tendrá que ser el promedio, también se debe definir los parámetros k_s y C_a que se encuentran en la Tabla 3.2 y Tabla 3.3. Por último, se define un coeficiente A de la Figura 3.24 el mismo que está en función del diámetro y la profundidad Z.

C_a = Promedio del corte no drenado C_u a una profundidad z .

Cu (kPa)	ϵ_{50}
50-100	0.007
100-200	0.005
200-400	0.004

Tabla 3.2 Valores de ϵ_{50} para arcillas sobre consolidadas.

k_s (MN/m ³)	50-100	200-300	300-400
Carga cíclica	135	270	540
Carga estática	55	110	540

Tabla 3.3 Valores de k_s para arcillas sobre consolidadas.

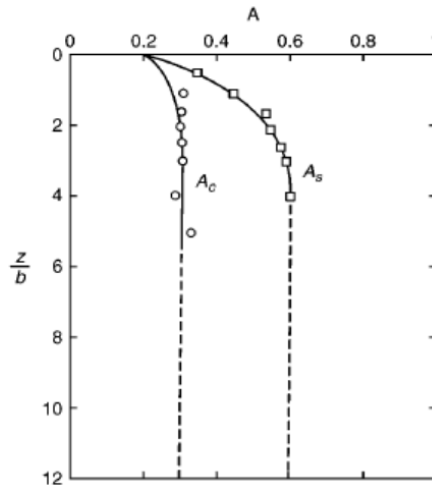


Figura 3.24 Valores coeficiente A_c - A_s .

Tomado de (Chiriboga & Mauro, 2018)

La carga P_c la resistencia última del suelo por unidad de la longitud se determina por las siguientes ecuaciones. El valor elegido de P_u es el menor valor calculado de las ecuaciones (3.3.8) y (3.3.9).

$$P_c = 2 C_a D + \gamma' D Z + 2.83 C_a Z \quad (3.3.8)$$

$$P_c = 11(C_u D) \quad (3.3.9)$$

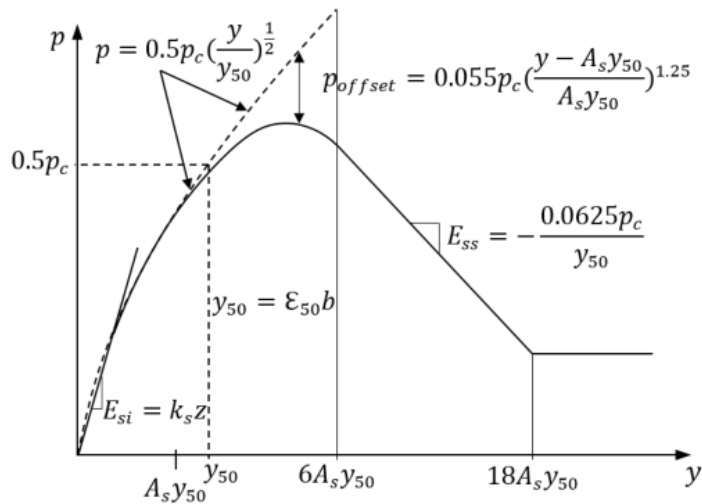


Figura 3.25 Curvas P - Y cargas estáticas para arcillas.

Tomado de (Matlock, 1970)

Analizando las curvas p-y de la (Figura 3.25) la carga P se obtiene de la ecuación (3.3.10), y va hasta el punto de intersección en $A_s y_{50}$ para la primera parábola.

$$P = \frac{1}{2} P_u \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{1/2} \quad (3.3.10)$$

La segunda parábola de la curva que va desde $A_s y_{50}$ hasta $6A_s y_{50}$:

$$P = \frac{1}{2} P_u \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{1/2} - 0.055 P_u \left(\frac{y - A_s y_{50}}{A_s y_{50}} \right)^{5/4} \quad (3.3.11)$$

Posterior la curva tiene un comportamiento lineal que va desde $6A_s y_{50}$ hasta $18A_s y_{50}$.

$$P = \frac{1}{2} P_u (6A_s)^{1/2} - 0.411 P_u - \frac{0.0625}{y_{50}} P_u (y - 6A_s y_{50}) \quad (3.3.12)$$

Finalmente se determina la horizontal desde $18A_s y_{50}$ hasta un valor n.

$$P = \frac{1}{2} P_u (6A_s)^{1/2} - 0.411 P_c - \frac{3}{4} (P_u A_s) \quad (3.3.13)$$

3.3.2.2 Carga Cíclica

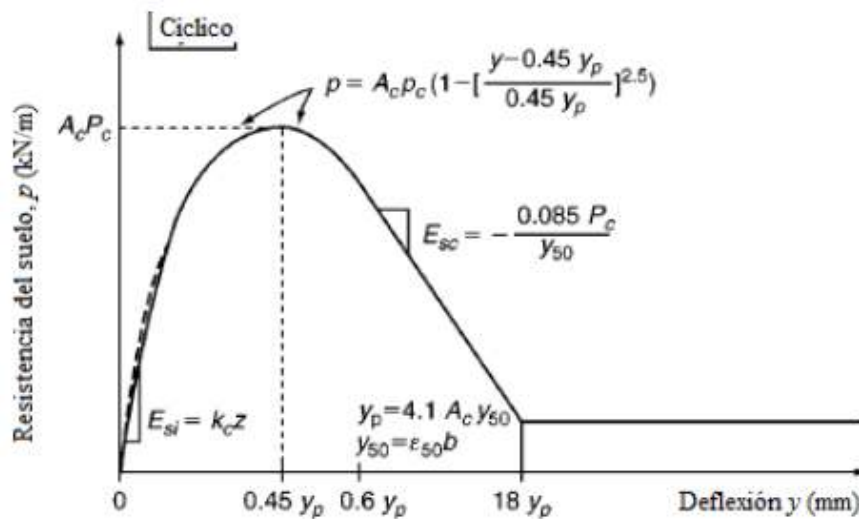


Figura 3.26 Curvas P-Y cargas cíclicas para arcillas.

Tomado de (Matlock, 1970)

La carga P_c la resistencia última del suelo por unidad de la longitud se determina por las siguientes ecuaciones. El valor elegido de P_u es el menor valor calculado de las ecuaciones (3.3.8) y (3.3.9). además, se verifica el valor correcto del coeficiente A_c de la Figura 3.24 y se calcula y_p .

$$y_p = 4.41A_c y_{50} \quad (3.3.14)$$

La parábola hasta $0.6p_y$ está en función de:

$$P = A_c P_u \left(1 - \left(\frac{y - 0.45y_p}{0.45y_p} \right)^{5/2} \right) \quad (3.3.15)$$

Ahora los puntos $y=0.6p_y$ hasta $y=1.8p_y$ se determina por:

$$P = 0.936A_c P_u - \frac{0.085}{y_{50}} P_u (y - 0.6y_p) \quad (3.3.16)$$

Finalmente, la línea recta de la

$$y = 1.8y_p \quad (3.3.17)$$

3.3.3 Curvas P-Y para Arenas

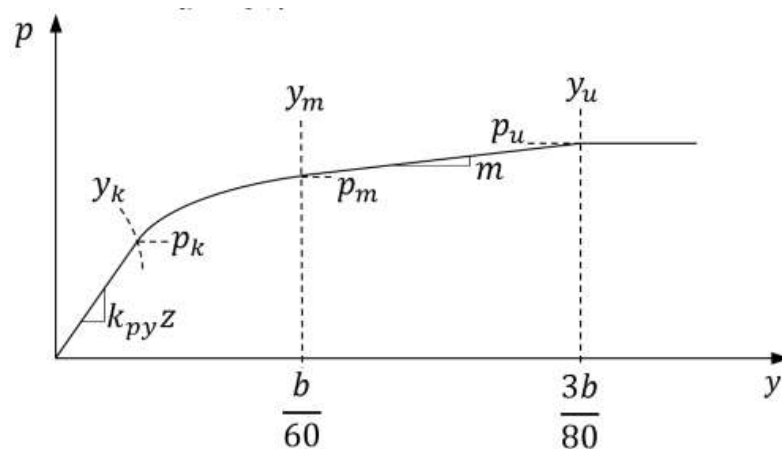


Figura 3.27 Curvas P-Y para Arenas

Tomado de (Matlock, 1970)

Los parámetros fundamentales para conocer el desarrollo de curvas P-Y en arenas es ϕ y γ' (el peso específico total si está por encima del nivel freático y el peso específico sumergido de ser lo contrario), además se requiere un valor de la Tabla 3.4 y del que depende la pendiente inicial en la curva, por último, se debe verificar el valor de A y B de la Figura 3.28.

Densidad relativa	Suelta	Media	Densa
k_{py} Rec (MN/m ³)	5.4	16.3	34

Tabla 3.4 Valores recomendados para k_{py} (Arena sumergida)

Densidad relativa	Suelta	Media	Densa
k_{py} Rec (MN/m ³)	6.8	24.4	61

Tabla 3.5 Valores recomendados para k_{py} (Arena seca)

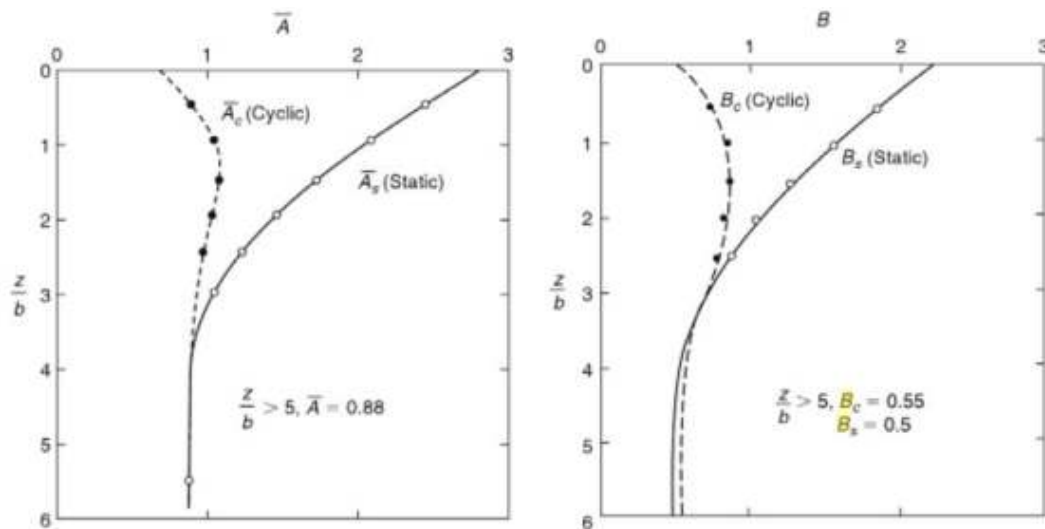


Figura 3.28 Coeficiente A y B para arenas.

Tomado de (Chiriboga & Mauro , 2018)

Ecuaciones para determinar la resistencia última del suelo por unidad de la longitud P_s :

$$\alpha = \phi/2 \quad (3.3.18)$$

$$\beta = 45 + \frac{\phi}{2} \quad (3.3.19)$$

$$K_o = 0.4 \quad (3.3.20)$$

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (3.3.21)$$

$$P_s = \gamma Z \left[\frac{K_o Z \tan \phi \sin \beta}{\tan (\beta - \phi)} + \frac{\tan \beta}{\tan (\beta - \phi)} (D + Z \tan \beta \tan \alpha) + K_o Z \tan \beta (\tan \phi \sin \beta - \tan \alpha) - K_a D \right] \quad (3.3.22)$$

$$P_s = K_a D \gamma Z (\tan^8 \beta - 1) + K_o D \gamma Z (\tan \phi \tan^4 \beta) \quad (3.3.23)$$

$$P_u = A_s P_s \quad (3.3.24)$$

$$P_m = B_s P_s \quad (3.3.25)$$

El valor de B_s y A_s se puede obtener de la Figura 3.28

3.4 Método Elementos Finitos (MEF)

La importancia de esta investigación es ver la bondad de modelos convencionales de elementos finitos para predecir resultados teóricos en el análisis de pilotes con carga lateral, ahora bien, previamente se debería definir el concepto de la modelación en elementos finitos, que no es más que una simplificación o reducción de un medio real a uno, en el cual es posible simplificar varias ecuaciones propias de un problema ingenieril.

La modelación es el método de manejo práctico o teórico de un sistema por medio del cual se estudiará este, pero no como tal, sino por medio de un sistema auxiliar natural o artificial, el cual, desde el punto de vista de los intereses planteados, concuerda con el sistema real que se estudie (Mejias Leiva, 2010).

El análisis de elementos finitos se inicia con una aproximación de la región de interés con un número de mallas, cada malla es la manera de comunicación de la geometría y se asociará en todo el elemento mediante nodos.

En resumen, el método de elementos finitos realiza un seccionamiento del dominio global de un objeto específico de estudio, para obtener partes más pequeñas, las cuales están relacionadas mediante nodos, que bien pueden ser parte del objeto o estar en su frontera. Las particiones del dominio se las conoce como discretización y al conjunto de nudos como malla (Figura 3.30).

3.4.1 Discretización

Para la aplicación de esta metodología como primer paso es estimar el mallado del modelo, se debe tener en cuenta la sección del elemento estructural y los estratos circundantes. La malla deberá estar en función de la capacidad de cálculo, lo que se traduce, en el número de grados de libertad y la precisión de los resultados numéricos, sin embargo, se podrían tener algunas consideraciones importantes para la discretización:

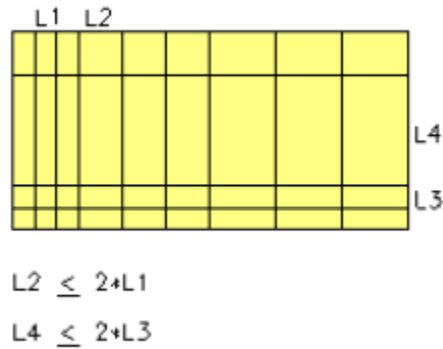


Figura 3.29 Proporciones recomendadas de mallado uniforme

Tomado de (Mejias Leiva, 2010).

El modelo analizado debe ser lo más compatible con el entorno como: geometría, cargas, condiciones límites.

Una adecuada optimización de la malla debe considerar ser suficientemente fina en las zonas donde exista mayor interacción con la carga, pero no lo bastante fina como para que consuma un exceso de recursos computacionales.

La relación de la magnitud de los elementos y su división será lo más aproximada a la unidad, esto quiere decir que mientras mayor sea la división del elemento menor deberá ser su tamaño.

La aplicación del mallado será la más uniforme posible con igual separación de nodos con el fin de obtener una correcta interpretación del comportamiento y resultados del sistema.

Un modelo estructural ideal limitará el problema real de infinitos grados de libertad, a uno donde se debe considerar las dimensiones geométricas como un medio finito, para lograr la anterior premisa se debe acotar en dimensiones finitas colocando restricciones y condiciones de borde en el perímetro del sistema sin que afecte la solución final.

3.4.2 Aplicación en un Medio Geotécnico

Uno de los instrumentos más utilizados en ingeniería civil que intenta predecir el comportamiento de estructuras geotécnicas bajo diferentes cargas y condiciones de frontera, es la simulación por computadora utilizando programas de elementos finitos.

Para el caso de estructuras geotécnicas, algunas de las ventajas del empleo de programas de elementos finitos radican en que pueden llegar a tener en cuenta que los suelos exhiben un comportamiento no lineal, dependiente de la condición de esfuerzos (Ruge, Pinto & Rondón 2014, pág. 172).

Este tipo de análisis numérico resulta indispensable, en algunos casos obligatorio para el geotecnista, debido que la modelación de la interacción suelo-pilote con sollicitación lateral requiere, la representación del pilote como viga y el suelo como un sólido circundante. Actualmente los métodos basados en elementos finitos sugieren que la respuesta mecánica ante cargas laterales, es no-lineal y obedece a la interacción de un grupo de factores, lo que hace muy compleja la tarea de determinar correctamente la rigidez inicial del sistema y los mecanismos a través de los cuales se desarrollan las deformaciones.

La vasta experiencia aplicando elementos finitos en la resolución de problemas de ingeniería lleva un costo elevado de recursos computacionales, sin embargo, la evolución de la tecnología en hardware, han facilitado e incrementado la eficiencia del software, tal que si se requiere modelar mediante elementos sólidos dado que generan resultados en base a modelos tridimensionales (3D), con un gran número de grados de libertad, entonces se deberá evaluar correctamente el mecanismo y de ser necesario estimar un buen mallado del entorno.

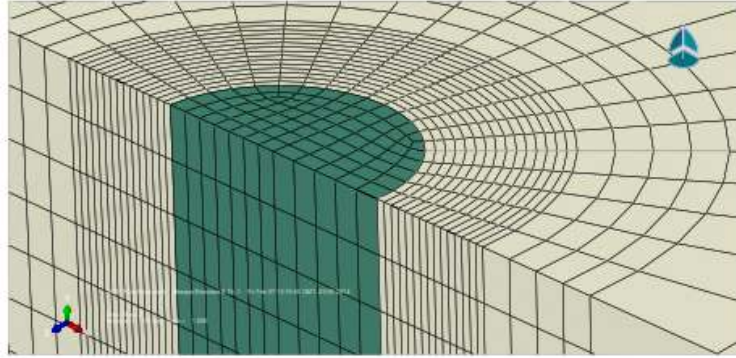


Figura 3.30 Detalle de malla utilizada en el entorno del pilote.

Tomado de (Turello, Pinto, & Sanchez, 2014)

En Investigaciones relacionadas con aplicación de elementos finitos en pilotes Turello, Pinto, & Sanchez (2014) afirman “El problema de pilotes cargados lateralmente involucra la respuesta lateral del suelo en las proximidades del pilote. La respuesta mecánica de este tipo de estructuras, cuando son sometidas a cargas laterales en la superficie, está fuertemente influenciada por la interacción suelo-estructura que se desarrolla en la porción de suelo y que abarca algunos diámetros alrededor del pilote” (pág. 881).

Para la modelación del sistema las condiciones de contorno en pilotes pueden ser: fronteras laterales e inferiores “libre el desplazamiento vertical y restringido el horizontal” y “libre el desplazamiento horizontal y restringido el vertical” respectivamente.

Las distancias verticales y horizontales para el modelado del pilote en elementos finitos pueden ser dos veces la longitud del pilote.

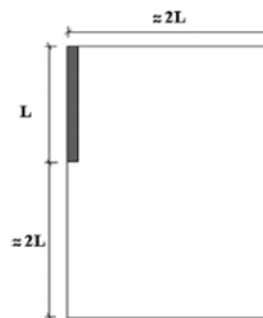


Figura 3.31 Distancias aproximadas para la modelación del pilote por elementos finitos.

Elaboración propia

4 **CAPÍTULO IV Caso de Estudio**

4.1 **Definición de Parámetros de Diseño del Pilote**

En la presente investigación para analizar pilotes con carga lateral se fijará longitudes de 8, 12 y 20 metros. Los parámetros de diseño de la sección se muestran a continuación:

D = 45 cm	Lado o cara del pilote
E_P = 30 GPa	Módulo de deformación del pilote
I_P = 3.42x10 ⁻³ m ⁴	Momento de Inercia del Pilote
Además, se definió un desplazamiento admisible de 0.02 metros	
δ_P = 2 cm	Desplazamiento Lateral

4.2 **Definición de Perfil Estratigráfico**

La adecuada definición del subsuelo permitirá diseños seguros y principalmente económicos para cimentaciones con pilotes. Conocida la estratigrafía en la zona de estudio se procederá a caracterizar geotécnicamente cada uno de los estratos existentes en la columna de suelo mediante ensayos in situ, además se complementará con ensayos de laboratorio sobre las muestras inalteradas obtenidas en el sondeo. La combinación de estos procedimientos debe permitir obtener un modelo del terreno que servirá para el cálculo de las diferentes metodologías de pilotes con sollicitación lateral.

4.2.1 **Perfil del Suelo**

Para el caso de estudio se considera un sondeo de 20 metros de longitud, los datos proporcionados por la perforación describen la siguiente columna estratigráfica Tabla 4.1. De igual manera se considerarán los ensayos de laboratorio descritos en el informe geotécnico correspondiente a la perforación.

En la Figura 4.1 se muestra categorizada la columna de suelo correspondiente juntamente con los ensayos realizados.

4.2.1.1 Litología

Perforación 20 metros	
Profundidad(m)	Descripción
0.00 – 1.20	Material de relleno arena y grava.
1.20 – 2.55	Limo arenoso no plástico, poco húmedo, presencia de vetillas de oxidación
2.55 – 5.55	Arena limosa pobremente graduada (SP-SM), color café oscuro, no plástica, de humedad muy baja, de compacidad media. Presencia de gravas hasta en un 4 %
5.55 – 9.00	Limo de baja compresibilidad (ML), color gris, de plasticidad baja, de humedad alta, de consistencia media. Presencia de arena hasta en 12 % y pómez
8.55 – 11.55	Arena limosa (SM), color gris oscuro, no plástica, de humedad baja, de compacidad suelta. Presencia de gravas hasta en un 3 % y pómez
11.55 – 14.55	Arcilla limo arenosa (CL-ML), de baja plasticidad, de color café oscuro, de plasticidad baja, de humedad media, de consistencia muy firme. Presencia de arena hasta en 41 %
14.55 – 21.00	Arena limosa con grava (SM), color gris oscuro, café grisáceo a café verdoso, no plástica, de humedad baja, de compacidad densa. Presencia de gravas hasta en un 16 % (14.55-17.55 m).

Tabla 4.1 Descripción de la Columna de Suelo

El nivel freático se encuentra a 12.5 metros de profundidad.

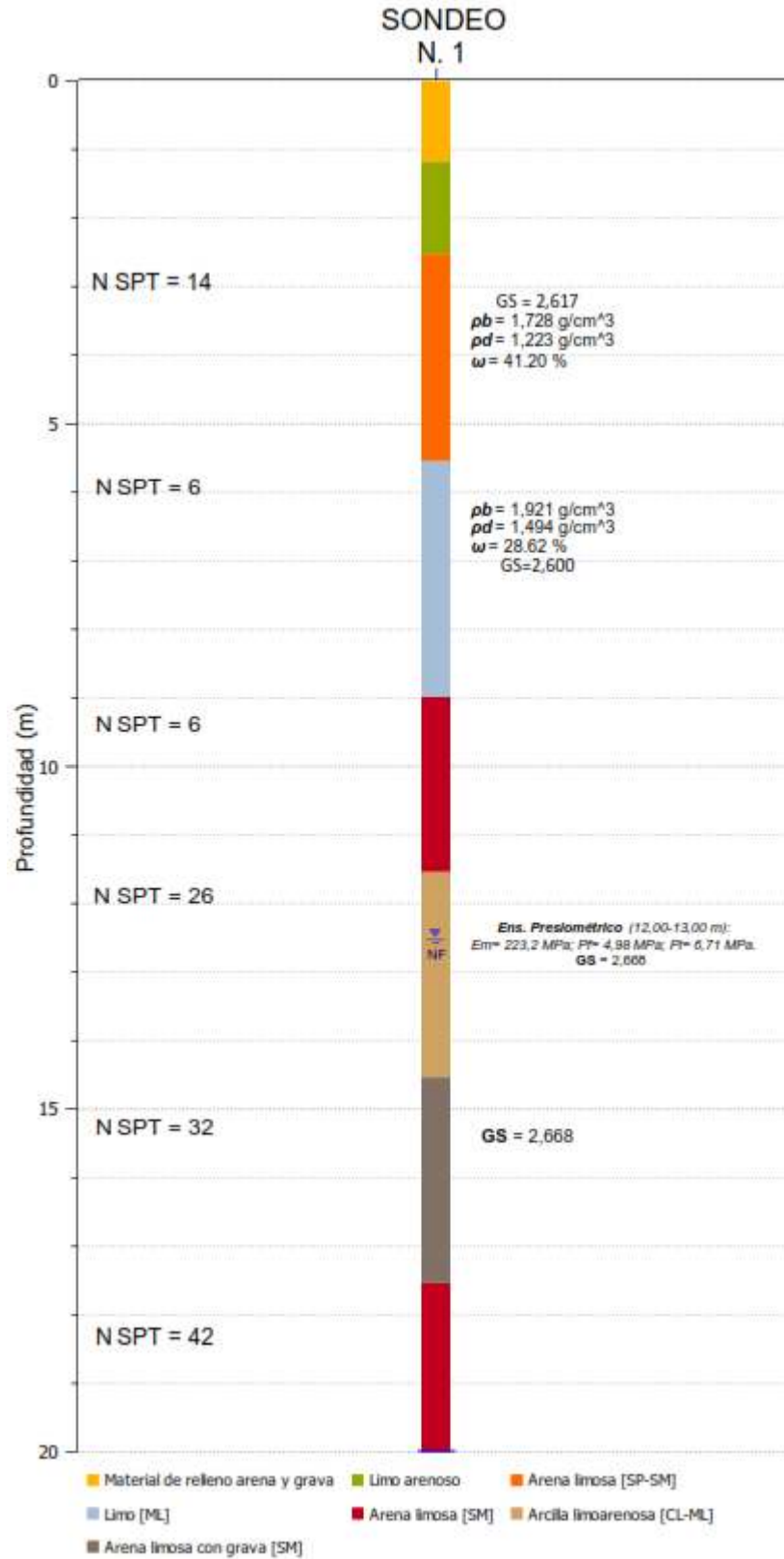


Figura 4.1 Columna de Suelo. Elaboración Propia

4.2.2 Parámetros de Cálculo Complementarios

Para determinar parámetros geotécnicos complementarios se tomará en cuenta correlaciones que estiman valores típicos para el cálculo de las metodologías descritas en la presente investigación.

Los parámetros geotécnicos complementarios deben ser orientativos y están sujetas a comprobación en ensayos de laboratorio.

Se obtendrá los parámetros geotécnicos complementarios que no se encuentren en los ensayos mediante correlaciones con el N_{60} determinado a partir de ensayos de penetración estándar SPT en los diferentes estratos.

4.2.2.1 Correlaciones con el valor N SPT y Módulo de Elasticidad del Suelo.

Para determinar el módulo de elasticidad de los diferentes estratos del perfil del suelo, se estimarán correlaciones definidas en el “Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Desing”. Kulhawy & Mayne, (1990) “El manual proponen una ecuación que correlaciona el N_{60} y el módulo de elasticidad “E” para diferentes tipos de suelo.

$$\frac{E}{Pa} = 5 * N_{60} \quad (4.2.1)$$

Bowles (1988) de igual manera propone una ecuación en base a número de golpes del SPT sin corregir.

$$E = 10 * (7.5 + (0.5 * N_{SPT})) \quad (4.2.2)$$

El informe geotécnico resume que se realizaron 6 ensayos de penetración estándar, los valores de N_{SPT} y profundidades se encuentran en la Figura 4.1

Aplicando la ecuación (4.2.1) se obtiene los valores corregidos del ensayo de penetración estándar N_{60} en los diferentes estratos. En la Figura 4.2 se realiza un resumen de valores de N_{60} y Módulos de Elasticidad para cada estrato.

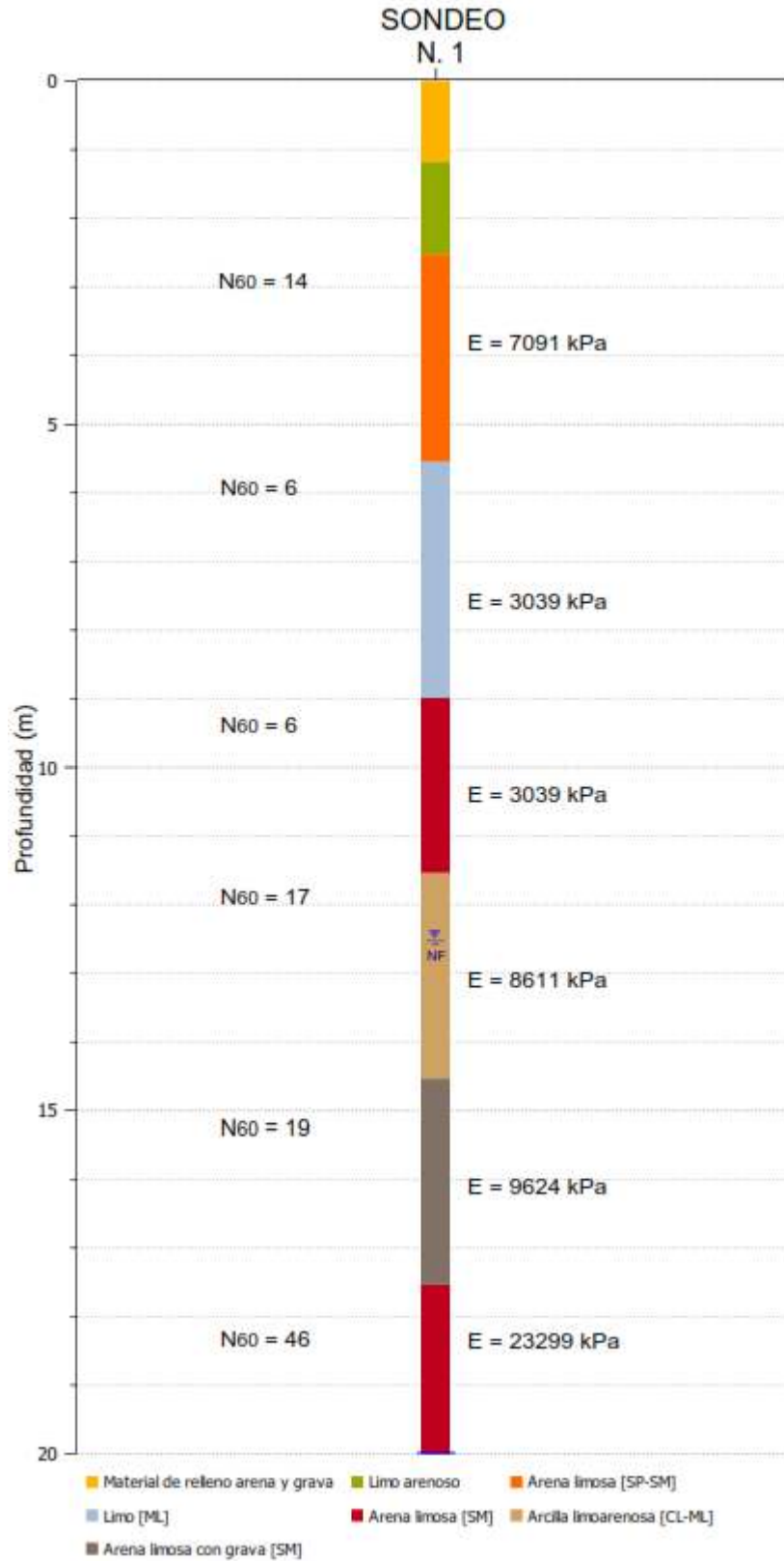


Figura 4.2 Valores de N60 y Módulos de Elasticidad. Elaboración Propia

4.2.2.2 Correlaciones con el valor N SPT y Ángulo de Fricción.

Para estimar el ángulo de fricción del suelo por medio de la prueba de penetración estándar varios autores han propuesto correlaciones que permiten calcular este parámetro, sin embargo, la literatura también resume que con la ecuación de (Peck 1974, Das 1995, Woff 1989) se obtiene resultados aceptables de ángulo de fricción.

$$\varphi = 27.1 + 0.30N_{60} - 0.00054N_{60}^2 \quad (4.2.3)$$

La ecuación (4.2.3) es una de las correlaciones con mayor aval para el cálculo de ángulo de fricción.

4.2.3 Correlaciones con el valor N SPT y la Resistencia al Corte no Drenado en Suelos Cohesivos.

Terzagui & Peck, (1948) proponen valores estimados de la Resistencia al Corte no Drenado que están basados al número de golpes del SPT sin corregir para suelos cohesivos.

En la Tabla 4.1 se muestra la presencia de arcilla a una profundidad de 11.55 metros hasta 14.55 metros, sin embargo, no se realizaron ensayos triaxiales en esa capa de suelo, pero si existe un dato de N SPT correspondiente al ensayo de penetración estándar, por lo tanto, a partir del N_{SPT} se determinará el valor de la resistencia al corte no drenado C_u .

N_{SPT} = 26

Se procederá a elegir un valor conservador por no estar definido por un ensayo de laboratorio.

C_u = 1.5 Kgf/cm² ≈ C_u = 15 tonf/m²

N_{SPT}	C_u Kgf/cm²
<2	< 0.125
2 - 4	0.125 - 0.25
4 - 8	0.25 - 0.5
8 - 15	0.5 - 1
15 - 30	1 - 2
> 30	> 2

Tabla 4.2 Valores de Resistencia la Corte no Drenado

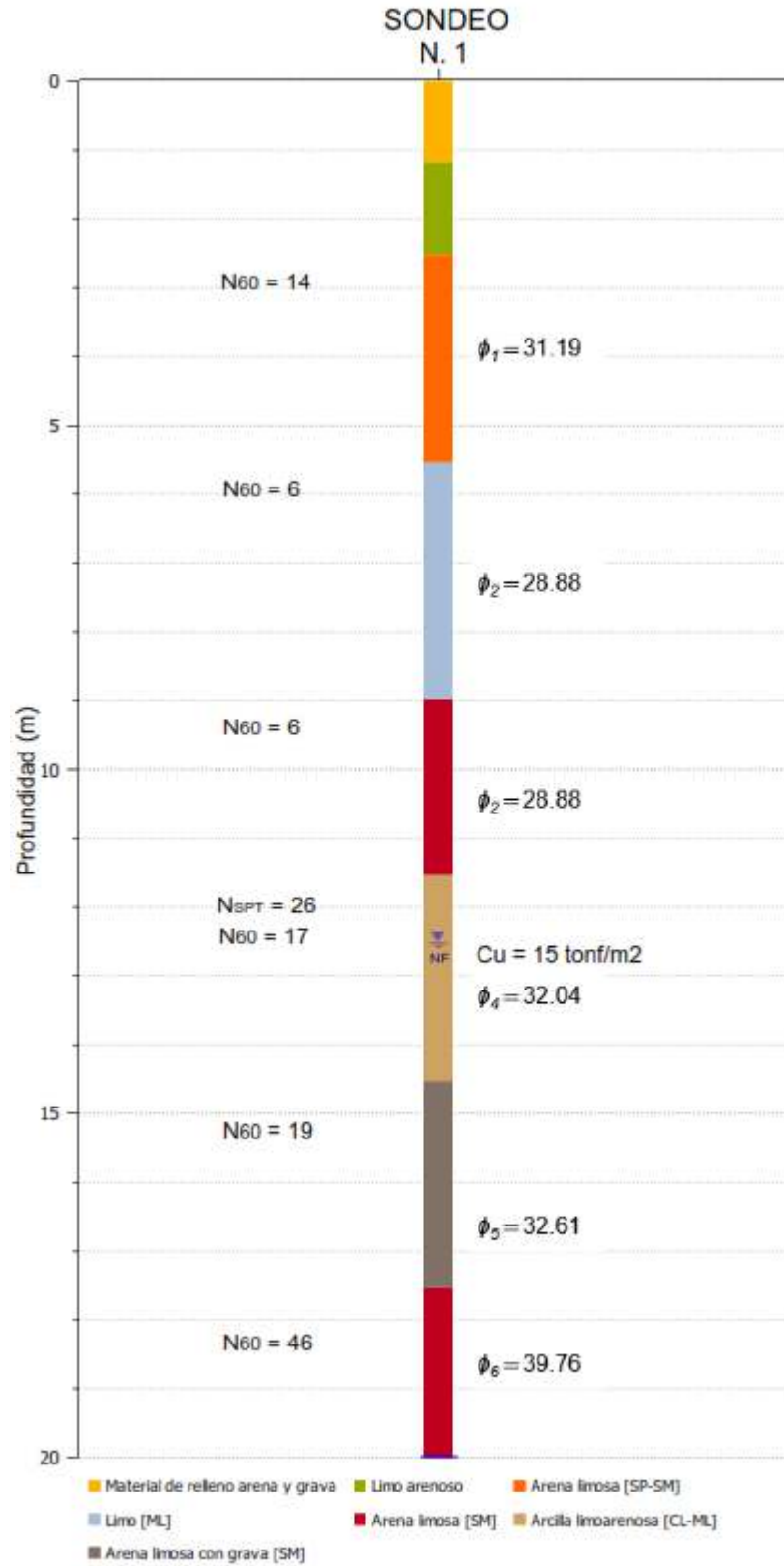


Figura 4.3 Valores de N60 y Angulo de fricción y Resistencia al corte no drenado. Elaboración Propia

4.2.3.1 Correlaciones con el valor N SPT y Peso Específico

Para estimar el peso específico a partir del número de golpes de la prueba de penetración estándar la presente investigación toma como referencia a Bowles (1997) que proporciona la Tabla 4.3 con valores de parámetros geotécnicos característicos, además los ángulos de fricción que indica Bowles (1997), son aproximados a los calculados por medio de la ecuación (4.2.3) propuesta por (Peck, Das & Woff), por lo que se valida el ángulo de fricción calculado en el apartado 4.2.2.2.

N	Des. Material	$\gamma(\text{kgf/m}^3)$	$\Phi(\text{GRADOS})$
0-4	Muy suelto	1100-1600	25-30
4-10	Suelto	1400-1800	27-32
10-30	Medio	1750-2050	30-35
30-50	Denso	1800-2250	35-40
50	Muy denso	2080-2400	30-43

Tabla 4.3 Valores Geotécnicos Típicos a partir de N Para suelos Sin Cohesión

N	Des. Material	$\gamma(\text{kgf/m}^3)$	$q_u(\text{kgf/cm}^2)$
0-2	Muy blando	1600	25-30
2-4	Blando	1600-1800	27-32
4-8	Medio	1750-2100	30-35
8-16	Duro	1800-2200	35-40
16-32	Muy duro	1950-2200	30-43

Tabla 4.4 Valores Geotécnicos Típicos a partir de N Para suelos Cohesivos

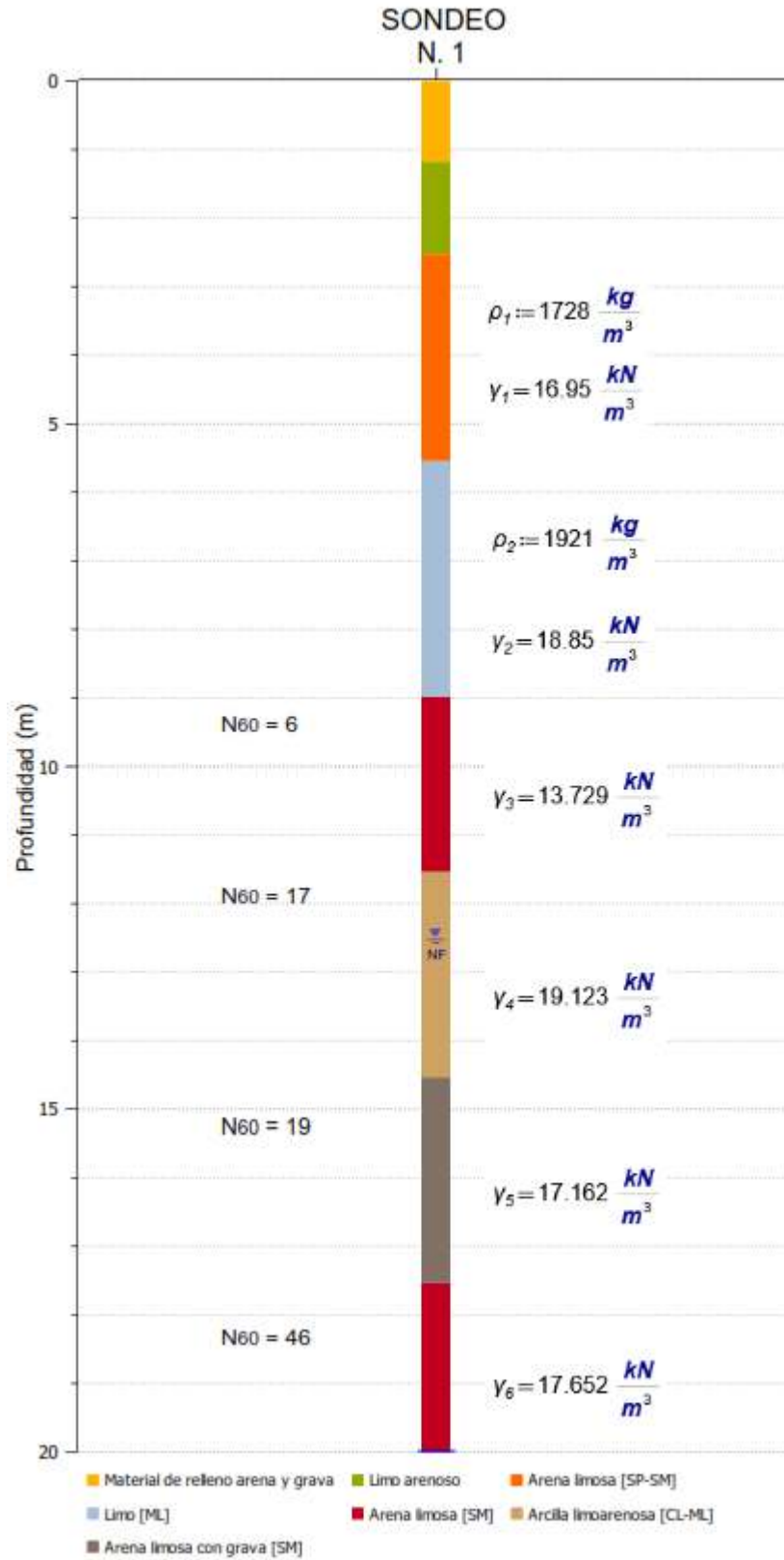


Figura 4.4 Pesos Específicos. Elaboración Propia

4.2.4 Resumen de Parámetros Geotécnicos Complementarios

Estrato	Espesor_(m)	N_{SPT}	N₆₀	E_(kPa)	φ	γ_(kN/m3)	Cu_(tonf/m2)
SP-SM	2.55	14	14	7091	31.19	16.95	
ML	3	6	6	3039	28.88	18.85	
SM	3.45	6	6	3039	28.88	13.73	
CL-ML	2.55	26	17	8611	32.04	19.12	15
SM	3	32	19	9624	32.61	17.16	
SM	3	42	49	23299	39.76	17.65	

Tabla 4.5 Resumen parámetros geotécnicos

4.3 Modelación

4.3.1 Teoría de Elasticidad

4.3.1.1.1 Columna Estratigráfica

En primer lugar, se definirá los parámetros de la columna estratigráfica para aplicar el método elástico basado en (Manual de Carreteras de Chile "Instrucciones y Criterios de Diseño", 2017).

Aplicando la siguiente ecuación se puede determinar el módulo de elasticidad en base a número corregido de golpes N_{60} del ensayo de penetración estándar.

Ejemplo de Cálculo módulo de elasticidad E :

Ecuación (4.2.1)

$P_a = 101.3 \text{ kPa}$

Presión atmosférica (Kulhawy & Mayne, 1990)

$$E = 5 * N_{60} * P_a$$

$$E = 5 * 14 * 101.3$$

$$E = 7091 \text{ kPa}$$

Estrato	Z(m)	N ₆₀	E(kPa)
SP-SM	2.55	14	7091
ML	3	6	3039
SM	3.45	6	3039
CL-ML	2.55	17	8611
SM	3	19	9624
SM	3	49	23299

Tabla 4.6 Módulos de Elasticidad

Z = Espesor de la capa del suelo

Debido que El método elástico considera el suelo, como un medio finito homogéneo se procede a realizar una ponderación de los módulos de elasticidad con las profundidades de cada estrato indicados en la Tabla 4.6, para determinar un valor de módulo de elasticidad representativo a lo largo de la longitud de desarrollo del pilote, con el fin de adaptar el caso de estudio a la metodología.

$$E_o := \frac{E_1 \cdot z_1 + E_2 \cdot z_2 + E_3 \cdot z_3 + E_4 \cdot z_4 + E_5 \cdot z_5 + E_6 \cdot z_6}{z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6} = 9.03 \text{ MPa}$$

$$E_o = 9020.41 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

El ejemplo de cálculo mostrado está considerando el pilote con 20 metros de longitud, pero se deberá realizar el mismo proceso en los pilotes de 8 y 12 metros propuestos en el caso de estudio, para determinar el módulo de elasticidad representativo respectivamente.

Un parámetro fundamental que complementa el cálculo es la constante de balasto que se determina utilizando la ecuación (3.1.9).

$$k_h = \frac{0.9 \cdot E_o}{D}$$

$$k_h = \frac{(0.9)(9020.41)}{0.45}$$

$$k_h = 1840.81 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$$

Cálculo de factores adimensionales λ para determinar la carga lateral.

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k_H D}{4 E_p I_p}} \text{ en } [1/\text{m}]$$

$$\lambda = 0.38 [1/\text{m}]$$

$$A_{\lambda z} := (\exp(-(\lambda \cdot Z))) \cdot (\cos(\lambda \cdot Z) + \sin(\lambda \cdot Z)) \quad A_{\lambda z} = 1$$

$$B_{\lambda z} := (\exp(\lambda \cdot Z)) \cdot \sin(\lambda \cdot Z) \quad B_{\lambda z} = 0$$

$$C_{\lambda z} := (\exp(\lambda \cdot Z)) \cdot (\cos(\lambda \cdot Z) - \sin(\lambda \cdot Z)) \quad C_{\lambda z} = 1$$

$$D_{\lambda z} := (\exp(-(\lambda \cdot Z))) \cdot \cos(\lambda \cdot Z) \quad D_{\lambda z} = 1$$

4.3.1.1.2 Cálculo de la Carga Lateral Máxima

Finalmente se procede a calcular la carga lateral de un pilote con cabeza libre y empotrada sin que exceda un desplazamiento admisible.

Despejando la carga P_1 ecuación (3.1.10) se obtendrá la carga lateral para un desplazamiento de 2 centímetros en pilotes de cabeza libre.

$$\delta_p = -\frac{2 P_1 \lambda}{k_H D} (e^{-\lambda z} (\cos \lambda Z))$$

Despejando la carga lateral P_1

$$P_1 = \frac{\delta_p * k_H * D}{2 * \lambda * D_{\lambda z}}$$

$$P_1 = 22.08 \text{ tonf}$$

Para pilotes de cabeza empotrada se aplica el mismo proceso, se despeja P_1 a la ecuación (3.1.17) para obtener el valor de la carga lateral que interactúa en el pilote.

$$\delta_p = \frac{P_1 \lambda}{k_H D} \left(2D_{\lambda z} - \frac{A_{\lambda z} C_{\lambda z}}{D_{\lambda z}} \right)$$

$$P_1 = \frac{\delta_p k_H D}{\lambda * \left(2D_{\lambda z} - \frac{A_{\lambda z} C_{\lambda z}}{D_{\lambda z}} \right)}$$

$$P_1 = 44.16 \text{ tonf}$$

Para determinar la carga lateral en los pilotes de 12 y 8 metros en las dos condiciones de cabeza libre y empotrada, se deberá realizar el proceso antes descrito ajustando el módulo de elasticidad en función a la profundidad del pilote que se desea calcular.

La Tabla 4.7 muestra el resumen de los resultados obtenidos de carga lateral admisible para un desplazamiento de 2 cm, calculados por el método elástico para pilotes de cabeza libre y cabeza impedida de girar.

Carga lateral		
Longitud (m)	Cabeza Libre (tonf)	Cabeza Restringida (tonf)
8	13,97	27,93
12	14,52	29,05
20	22,08	44,16

Tabla 4.7 Resumen de Resultados Método Elástico

4.3.2 Método de Broms

4.3.2.1 Consideraciones de Cálculo

El cálculo de pilotes cargados lateralmente (Broms B. , 1964) parte de una clasificación de acuerdo con el material circundante del elemento, en el caso de estudio de la presente investigación la columna de suelo presenta la mayor parte de estratos con material granular, por consiguiente, se considerará el modelo de Broms para suelos friccionantes, además de clasificar el tipo de suelo, Broms subdivide los pilotes en pilotes cortos y pilotes largos.

Para proceder a la clasificación de los pilotes por la longitud se deberá definir el módulo de reacción del suelo n_h , en la siguiente Tabla 4.8 muestran valores típicos de módulo de reacción de suelo en función al tipo de material granular.

Se deberá definir el módulo de reacción de suelo para cada longitud de pilote, para esto se realizará un promedio ponderado de las profundidades y número de golpes corregido del ensayo de penetración estándar.

Los datos para el ejemplo de cálculo se encuentran en la Tabla 4.5

Ejemplo de cálculo para pilote de 20 metros de longitud:

$$N_{60} := \frac{N_{C1} \cdot Z_1 + N_{C2} \cdot Z_2 + N_{C3} \cdot Z_3 + N_{C4} \cdot Z_4 + N_{C5} \cdot Z_5 + N_{C6} \cdot Z_6}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6} = 17.8$$

$$N_{60} = 17.8$$

Según la Tabla 4.3 la clasificación para material granular correspondiente a un valor de $N_{60} = 17.8$ es Arena media, por lo tanto, el módulo de reacción del suelo para un pilote de 20 metros de longitud tomara un valor de 0.67 kg/cm^3 obtenido de la Tabla 4.8

Valores de η_h según el tipo de arena

Tipo de Arena	$\eta(\text{kg/cm}^3)$
Arena Suelta	0.22
Arena Media	0.67
Arena Densa	1.19

Tabla 4.8 Valores de Módulo de Reacción del Suelo

Es importante definir que los valores que se muestran en la tabla anterior son aplicables a suelos en estado natural, sin embargo, para suelos en estado saturado este valor de cálculo equivaldría al 60%.

$$\eta = \sqrt[5]{\frac{\eta_h * 0.60}{EpIp}}$$

$$\eta = 0.521 \frac{1}{m}$$

$$\eta * L = 6.25$$

Pilote largo según Broms $\eta * L > 4$

4.3.2.1.1 Cálculo de la carga lateral máxima

Se efectuará el cálculo para un pilote de 20 metros de longitud en consideraciones de suelo como un medio finito homogéneo.

Debido que se fijó el desplazamiento admisible para pilotes de 2 cm, se procede a despejar P de la ecuación (3.2.31) para obtener el valor de la carga lateral que actuará en un pilote de cabeza libre correspondiente a tal desplazamiento.

$$\delta = \frac{2.40 P}{\eta_h^{\frac{3}{5}} (EI)^{\frac{2}{5}}}$$

$$P = \frac{\delta * \eta_h^{\frac{3}{5}} * (EI)^{\frac{2}{5}}}{2.40}$$

$$P = 12.33 \text{ tonf}$$

Se realiza el mismo proceso con ecuación (3.2.33) para determinar la carga lateral máxima que actúa en un pilote de cabeza empotrada o impedida de girar.

$$\delta = \frac{0.93 P}{\eta_h^{\frac{3}{5}} (EI)^{\frac{2}{5}}}$$

$$P = \frac{\delta * \eta_h^{\frac{3}{5}} * (EI)^{\frac{2}{5}}}{0.93}$$

$$P = 31.83 \text{ tonf}$$

A continuación, la Tabla 4.9 describe los resultados obtenidos de pilotes con diferentes condiciones de apoyo en la cabeza, resueltos con la metodología de Broms.

Carga lateral		
Longitud (m)	Cabeza Libre (tonf)	Cabeza Restringida (tonf)
8	8,59	22,17
12	12,33	31,83
20	17,41	44,92

Tabla 4.9 Resumen de Resultados Método de Broms

4.3.3 Modelos P-Y

La solución de curvas P-Y para pilotes con solicitación lateral desarrollada en el marco teórico, se puede aplicar con el uso del programa PyPile desarrollado por Yonggeng Ye, M.Sc., P.Eng.

A continuación, se describe el proceso de modelación en el programa que utiliza diferencias finitas para desarrollar la solución.

A diferencia de los métodos anteriores como la Teoría de Elasticidad y Método de Broms, las curvas P-Y desarrollan una configuración de terreno más acorde al modelo de columna estratigráfica que se tiene en el caso de estudio. La conceptualización del suelo en el caso de las curvas P-Y es un medio finitamente heterogéneo, ingresando las características geotécnicas de cada estrato de la columna de suelo al programa.

4.3.3.1 Ingreso de Datos Pilote PyPile

Se ingresan los datos generales del pilote, la longitud de 20 metros, el módulo de elasticidad del pilote $E_P=30$ GPA y el lado o diámetro del pilote $D=45\text{cm}$. En la Figura 4.5 se muestra el ingreso de datos del pilote.

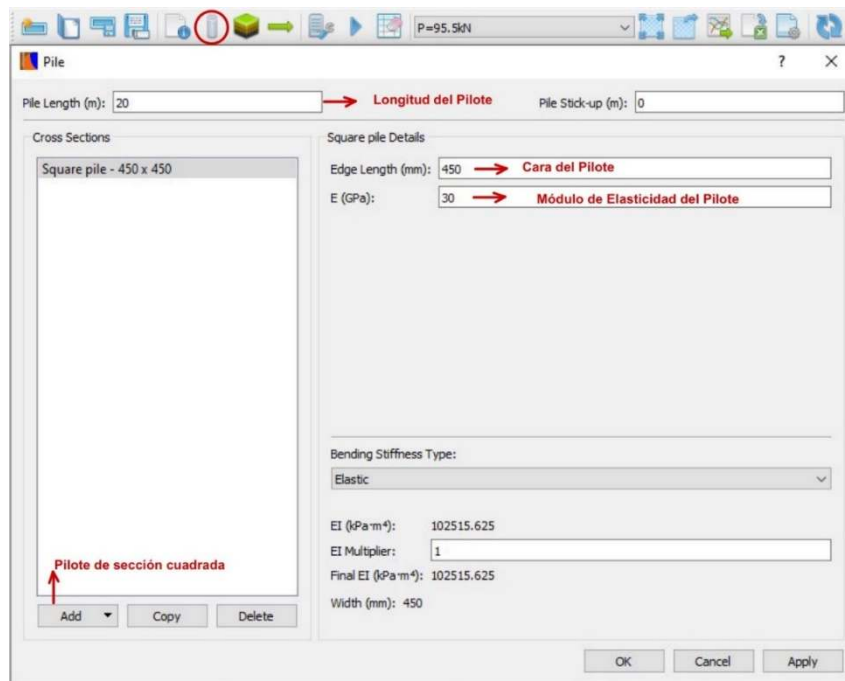
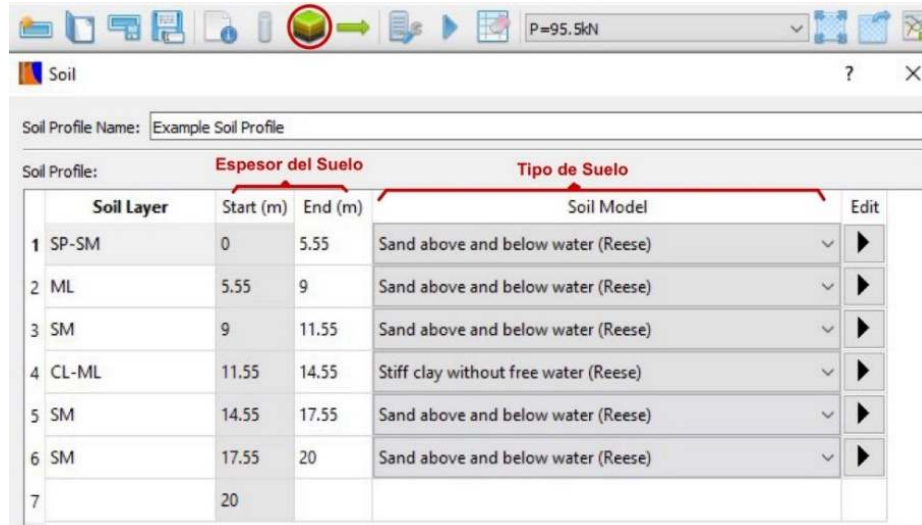


Figura 4.5 Ingreso de parámetros del pilote. PyPile

4.3.3.2 Columna de Suelo en PyPile

Como segundo paso se deberá ingresar los datos de las propiedades mecánicas y espesores en los diferentes estratos.



Soil Profile:		Espesor del Suelo		Tipo de Suelo	
Soil Layer	Start (m)	End (m)	Soil Model		Edit
1 SP-SM	0	5.55	Sand above and below water (Reese)		▶
2 ML	5.55	9	Sand above and below water (Reese)		▶
3 SM	9	11.55	Sand above and below water (Reese)		▶
4 CL-ML	11.55	14.55	Stiff clay without free water (Reese)		▶
5 SM	14.55	17.55	Sand above and below water (Reese)		▶
6 SM	17.55	20	Sand above and below water (Reese)		▶
7	20				

Figura 4.6 Tipo y espesor de los estratos. PyPile

Se podrá observar en la Figura 4.6 los espesores de los estratos con su respectivo modelo de suelo. A diferencia de los métodos anteriores como la teoría de elasticidad y método de Broms, las curvas P-Y, reconocen que el suelo es un medio finitamente heterogéneo, esto quiere decir que consideran las propiedades geomecánicas de cada estrato.

4.3.3.2.1 Estrato No Cohesivo

Ingreso de parámetros para suelos granulares, se podrá observar en la Figura 4.7 los estratos con su respectivo modelo de suelo. Por ejemplo, hasta la profundidad de 5.55 metros se tiene “Arenas limosas pobremente graduada (SP-SM), color café oscuro, no plástica, de humedad muy baja. Presencia de gravas hasta en un 4 %”

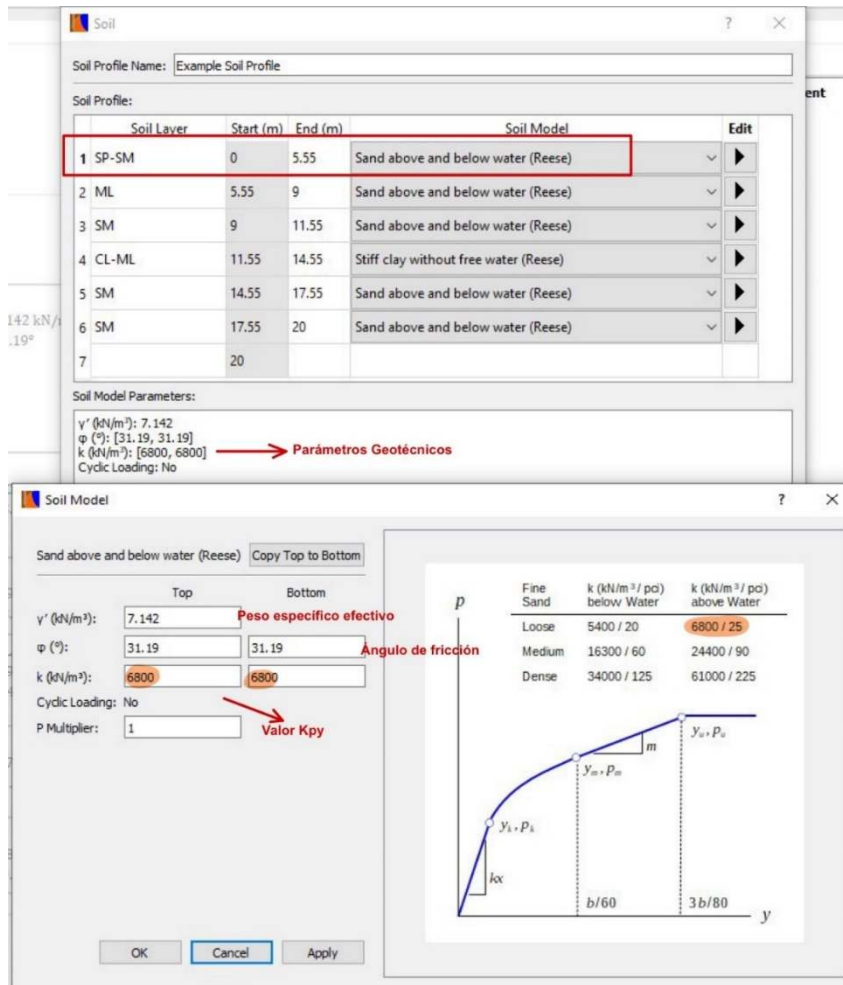


Figura 4.7 Propiedades geotécnicas suelos sin cohesión. PyPile

Los valores de peso específico efectivo se obtuvieron restando el peso específico en estado natural y el peso específico del agua, además el ángulo de fricción se determinó por correlaciones del número de golpes corregido N_{60} del ensayo de penetración estándar indicados en la Tabla 4.5.

Peso específico efectivo:

$$\gamma' = \gamma - \gamma_w$$

$$\gamma' = 16.95 - 9.81$$

$$\gamma' = 7.142 \frac{kN}{m^3}$$

Se ingresará el ángulo de fricción ($\phi=31.19$) del respectivo estrato Tabla 4.5

El valor de k_{py} a definir dependerá, si el material granular es suelto, medio o denso, además se deberá verificar si la arena se encuentra por encima o por debajo del nivel freático. Los valores típicos para la selección de k_{py} se encuentran en la Tabla 3.4 y Tabla 3.5 del epígrafe Curvas P-Y para Arenas.

El valor $k_{py}=k$ escogido es 6.8 MN/m^3 sabiendo que es una arena suelta por encima del nivel freático.

4.3.3.2 Estrato Cohesivo

Se pudo observar que en la perforación existe una capa de Arcilla limo arenosa (CL-ML), de baja plasticidad, de color café oscuro, de plasticidad baja, de humedad media, de consistencia muy firme. Este estrato se encuentra entre 11.55 metros y 14.55 metros. Py Pile también permite ingresar parámetros para suelos cohesivos.

La capa de suelo se encuentra en el nivel freático, el informe geotécnico proporciona valores de gravedad específica $G_s=2.668$ y contenido de humedad del estrato $w=0.24$, por lo cual se procede a correlacionar estos datos con ecuaciones para el obtener peso específico en estado saturado.

$$\gamma_{sat} = \left(\frac{1 + \omega}{1 + \omega * G_s} \right) * G_s * \gamma_w$$

$$\gamma_{sat} = \left(\frac{1 + 0.24}{1 + 0.24 * 2.668} \right) * 0.24 * 9.81$$

$$\gamma_{sat} = 19.79 \frac{kN}{m^3}$$

Peso específico efectivo:

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

$$\gamma' = 19.79 - 9.81$$

$$\gamma' = 9.98 \frac{kN}{m^3}$$

El valor de $\epsilon_{50}=0.005$ se obtiene de la Tabla 3.2 con un valor referencial obtenido a partir de $C_u=1.5 \text{ tonf/cm}^2$ o 147.1 kPa . Tabla 4.2

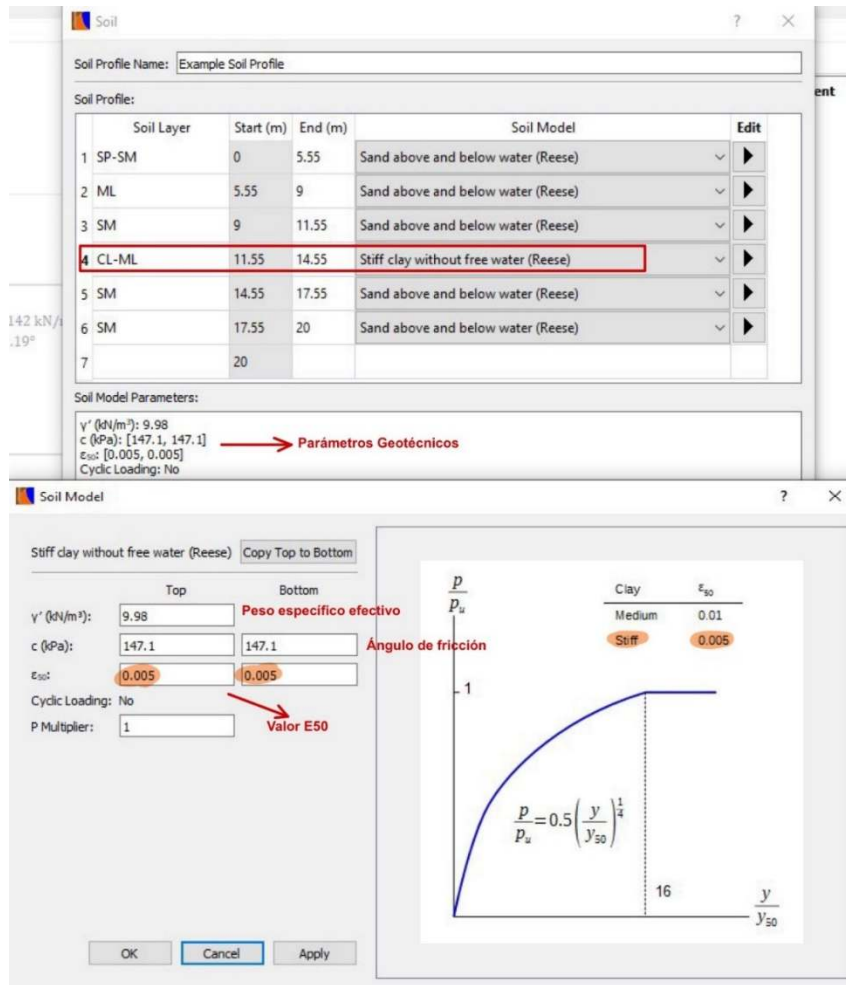


Figura 4.8 Parámetros geotécnicos suelos cohesivos. PyPile

4.3.3.2.3 Cálculo de la Carga Lateral Máxima

Se debe configurar las condiciones para que el programa PyPile analice y solucione el modelo, entre estos parámetros se establece la discretización del elemento (Pilote), el número de iteraciones y tolerancia para la solución, además, es importante ingresar el desplazamiento admisible fijado correspondiente a 2 centímetros.

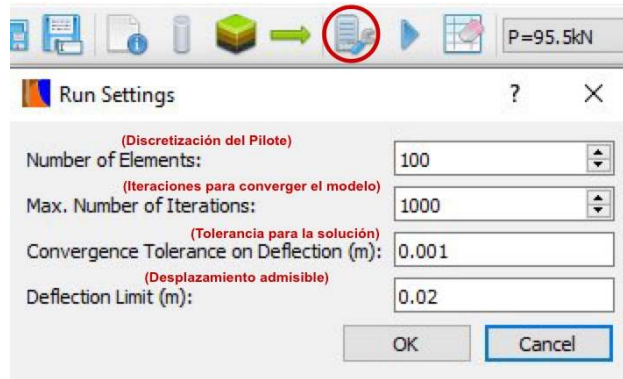


Figura 4.9 Configuraciones del Modelo. PyPile

Como paso final el programa tiene dos formas de proporcionar una solución para la carga lateral, la primera es colocando un incremento de carga hasta llegar a los 2 centímetros de desplazamiento, de esta manera se puede aproximar un valor y ajustar, haciendo un proceso iterativo y llegar a una aproximación de 0.001 m

4.3.3.2.4 Pilotes de Cabeza Libre

PyPile permite seleccionar la condición de apoyo en la cabeza del pilote en la siguiente Figura 4.10.

Se muestra los valores con los cuales se ajustó la carga lateral sin que sobrepase el desplazamiento admisible.

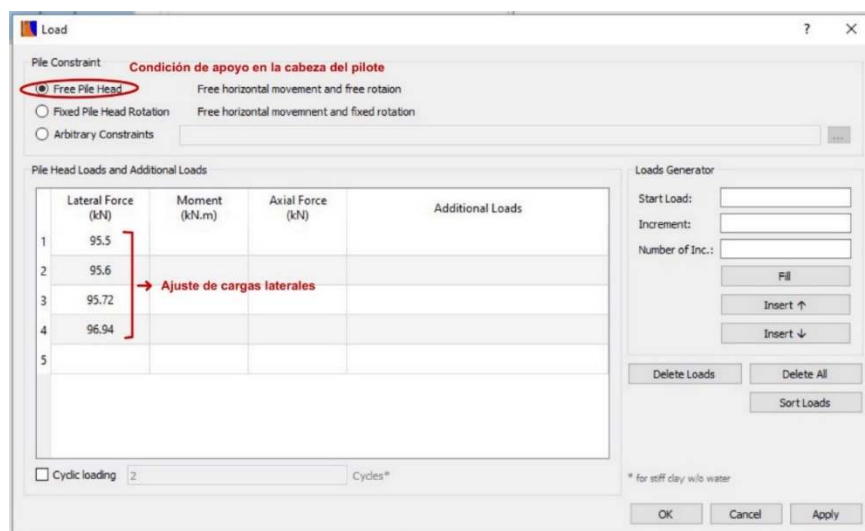


Figura 4.10 Ajuste de Carga Lateral (Pilote Cabeza Libre). PyPile

Graficas de desplazamiento vs profundidad, fuerza de corte vs profundidad y momento vs profundidad.

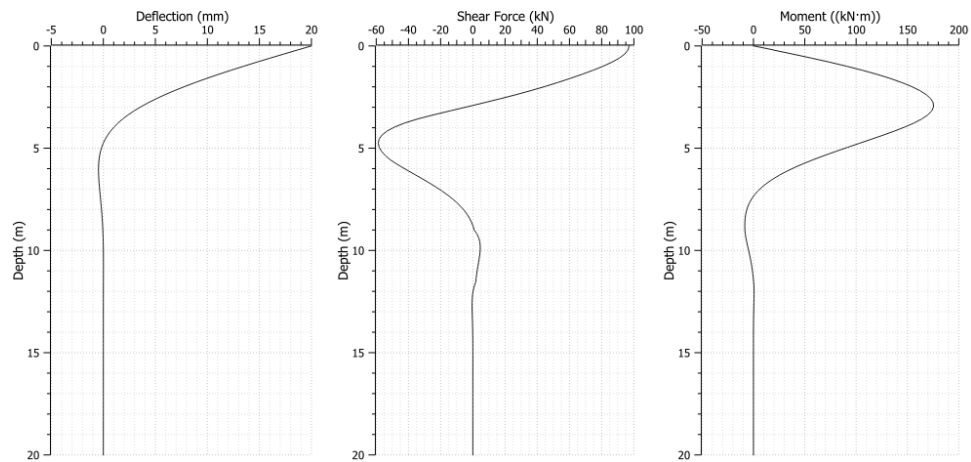


Figura 4.11 Comportamiento del Pilote con la Profundidad. PyPile

La máxima carga que soporta un pilote de 20 metros de longitud con cabeza libre, sin que exceda el desplazamiento de 2 centímetros es:

$$P = 96.94 \text{ kN} = 9.89 \text{ tonf}$$

4.3.3.2.5 Pilotes de Cabeza Empotrada

PyPile permite seleccionar la condición de apoyo en la cabeza del pilote en la siguiente se muestra los valores con los cuales se ajustó la carga lateral sin que sobrepase el desplazamiento admisible.

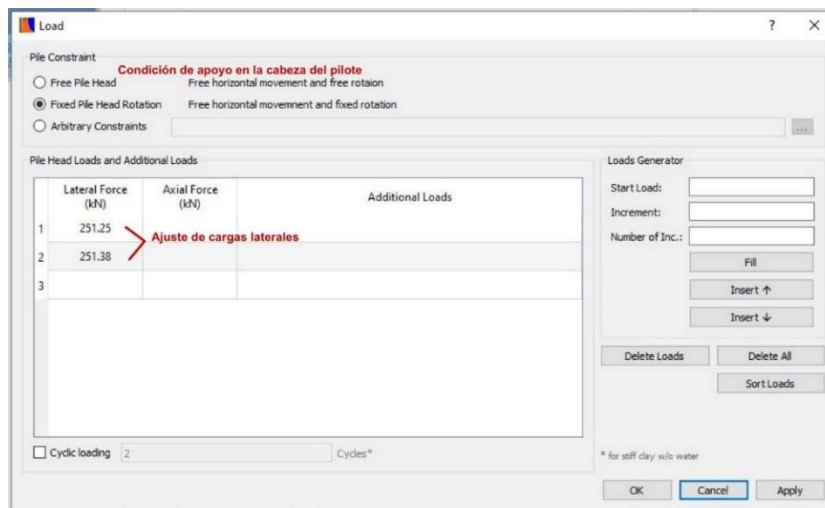


Figura 4.12 Ajuste de Carga Lateral (Pilote cabeza restringida). PyPile

Graficas de desplazamiento vs profundidad, fuerza de corte vs profundidad y momento vs profundidad.

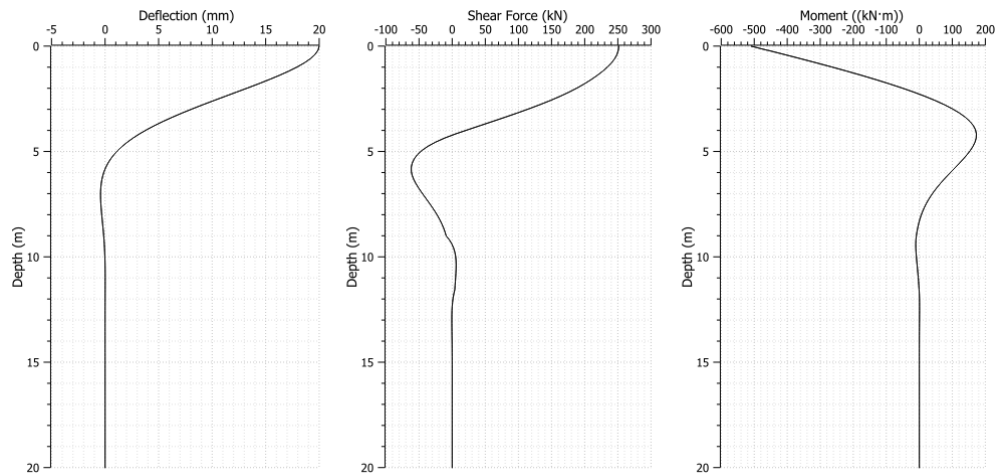


Figura 4.13 Comportamiento del pilote ante una carga lateral Py-Pile. PyPile

La máxima carga que soporta un pilote de 20 metros de longitud con cabeza impedida de girar o empotrada, sin que exceda el desplazamiento de 2 centímetros es:

$$P = 261.38 \text{ kN} = 25.63 \text{ tonf}$$

A continuación, la Tabla 4.10 describe los resultados obtenidos de pilotes con diferentes condiciones de apoyo en la cabeza, resueltos con la metodología de curvas P-Y.

Carga P en pilotes de 8, 12 y 20 metros de longitud con cabeza libre y empotrada.

Carga Lateral		
Longitud (m)	Cabeza Libre(tonf)	Cabeza Restringida(tonf)
8	9,86	25,48
12	9,89	25,62
20	9,89	25,63

4.3.4 Elementos Finitos

Para desarrollar la solución por Elementos Finitos de pilotes con solicitación lateral se deben volver a definir parámetros tanto del pilote como de la columna de suelo que se va a analizar. El análisis de Elementos Finitos se lo realizará con el programa OpenSeesPL.

4.3.4.1 Ingreso de Datos Característicos del Pilote

Los datos que solicita el programa para el modelado del pilote con solicitación lateral en elementos finitos son los siguientes:

- L** = 8, 12, 20 metros Longitud del Pilote
 - D** = 45 cm Lado o cara del pilote
 - E_P** = 30 GPa Módulo de deformación del pilote
- Además, se definió un desplazamiento admisible de 0.02 metros
- δ_P** = 2 cm Desplazamiento Lateral

En el ejemplo de cálculo se considera un pilote de cabeza libre con 20 metros de longitud de sección cuadrada.

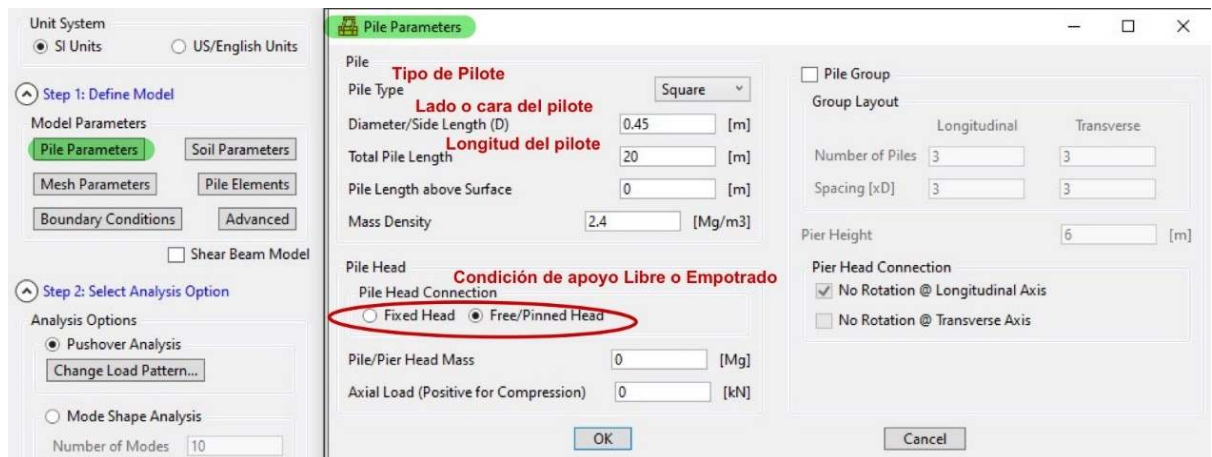


Figura 4.14 Configuración de parámetros del pilote. OpenSeesPL.

El módulo de elasticidad y el módulo de corte del pilote son parámetros complementarios que se ingresa en el software.

Módulo de Elasticidad:

$$E = 30 \text{ GPa}$$

Módulo de Corte del Pilote:

El módulo de corte del pilote G es el 40% del módulo de elasticidad expresión referenciada American Concrete Institute ACI 318-19.

$$G_p = 0.4 * E_p \quad (4.3.1)$$

$$G_p = 0.4 * 30$$

$$G_p = 12 \text{ Gpa}$$

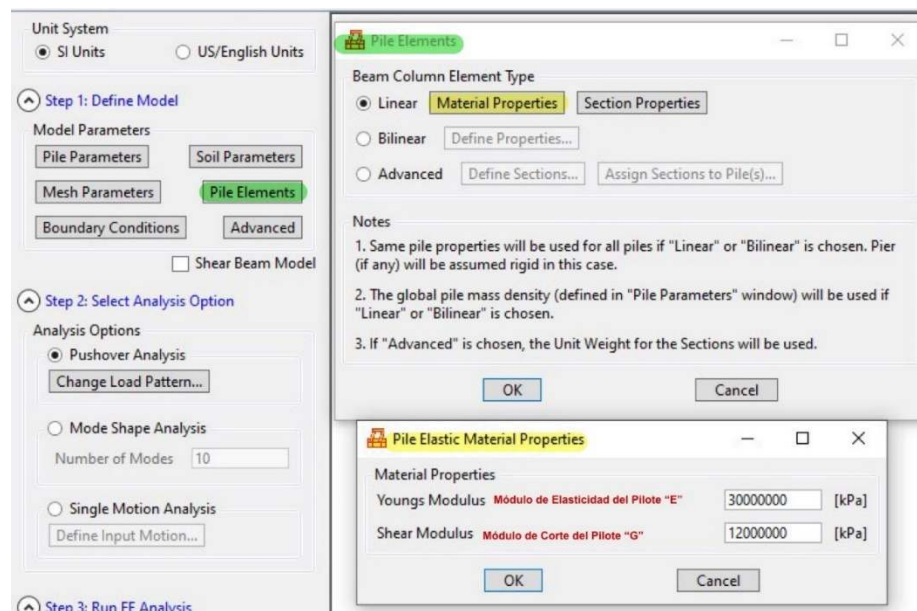


Figura 4.15 Asignación del Módulo de Corte. OpenSeesPL

El comportamiento del concreto es lineal por ese motivo solamente se definió el módulo de elasticidad y el módulo de corte del pilote en el programa. En el caso de que el pilote fuera metálico el análisis deberá ser bilineal.

4.3.4.2 Columna Estratigráfica

Anteriormente se definió parámetros como el ángulo de fricción y módulo de elasticidad a partir de correlaciones con el N_{60} , ahora para el método de elementos

finitos el software solicita datos adicionales como el módulo de corte del suelo G y el módulo de compresibilidad volumétrica.

4.3.4.2.1 Estrato No Cohesivo

El programa permite seleccionar el suelo tipo granular y posterior definir datos geotécnicos de ensayos basados en mecánica de suelos.

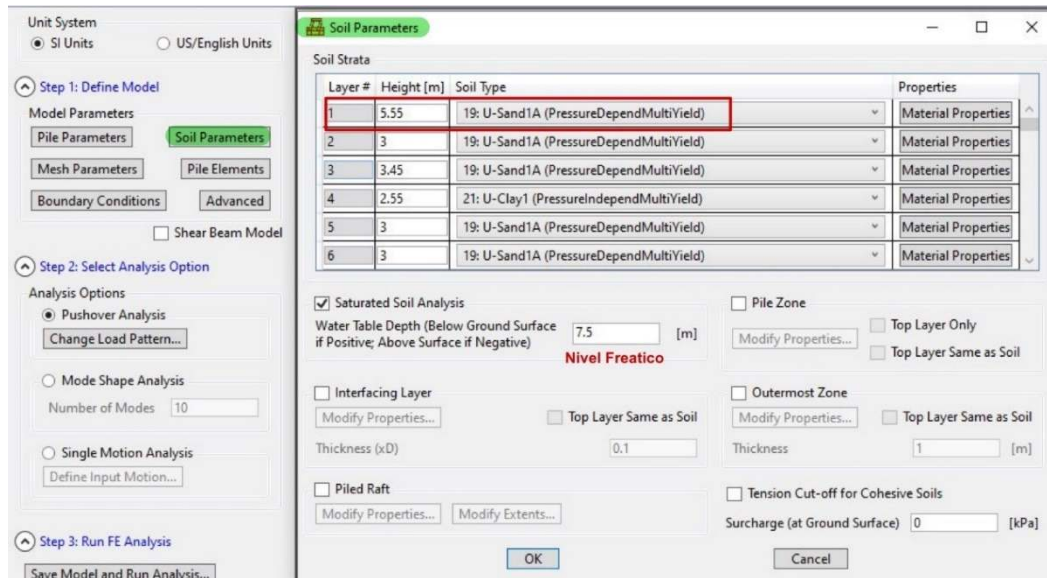


Figura 4.16 Definición de Suelo Granular. OpenSeesPL

Entre los parámetros que solicita el programa se encuentran densidad, ángulo de fricción, módulo de compresibilidad volumétrica y módulo de corte del suelo.

Las expresiones de cálculo para estos parámetros son:

Módulo de corte del suelo:

$$G = \frac{E}{2 * (1 + \nu)} \quad (4.3.2)$$

Es importante mencionar que los datos de coeficiente de poisson son obtenidos de la siguiente Tabla 4.11 donde se tomara valores conservadores para suelos cohesivos y granulares.

Tipo de Suelo	Coefficiente de Poisson
Arcilla	0.2 – 0.4
Arena densa	0.3 – 0.4
Arena suelta	0.1 – 0.3

Tabla 4.11 Coeficientes para suelos cohesivos y no cohesivos

Módulo de Compresibilidad Volumétrica:

$$B = \frac{E * G}{3 * (3 * G - E)} \quad (4.3.3)$$

Ejemplo de Cálculo:

Módulo de Corte del Suelo (SP-SM):

$$G = \frac{E}{2 * (1 + \nu)}$$

$$G = \frac{7091}{2 * (1 + 0.3)}$$

$$G = 2727.31 \text{ kPa}$$

Módulo de compresibilidad volumétrica del suelo (SP-SM):

$$B = \frac{E * G}{3 * (3 * G - E)}$$

$$B = \frac{7091 * 2727.31}{3 * (3 * 7091 - 2727.31)}$$

$$B = 5909.17 \text{ kPa}$$

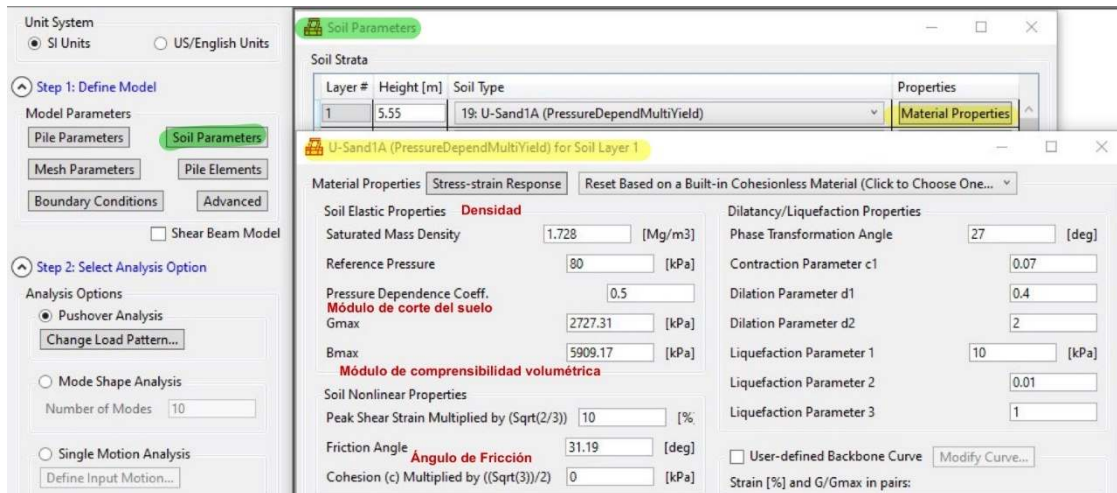


Figura 4.17 Propiedades geotécnicas del Suelo Granular. OpenSeesPL

4.3.4.2.2 Estrato Cohesivo

El programa tiene la opción de elegir diferentes tipos de arcilla, la selección de este tipo de suelo será definida por los datos geotécnicos que se disponga en los ensayos basados en mecánica de suelos.

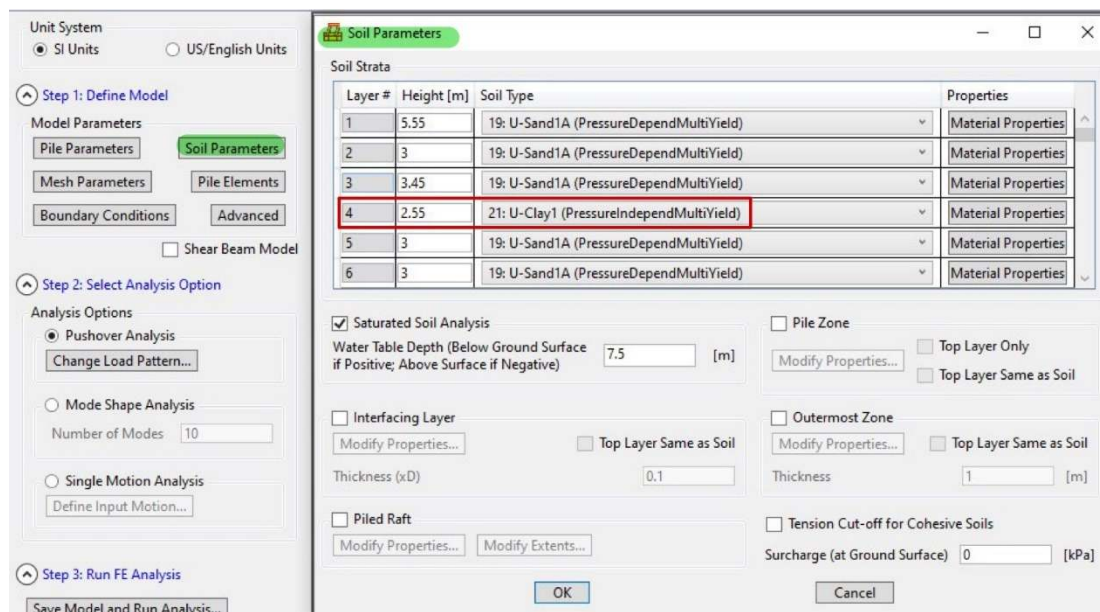


Figura 4.18 Definición de Suelo Cohesivo. OpenSeesPL

Entre los parámetros que solicita el programa se encuentran densidad, ángulo de fricción, cohesión, módulo de compresibilidad volumétrica y módulo de corte del suelo.

El módulo de corte y módulo de compresibilidad volumétrica se calcularán con las expresiones (4.3.2) y (4.3.3).

Ejemplo de Cálculo:

Módulo de Corte del Suelo (CL-ML):

$$G = \frac{E}{2 * (1 + \nu)}$$

$$G = \frac{8610.5}{2 * (1 + 0.3)}$$

$$G = 3311.73 \text{ kPa}$$

Módulo de compresibilidad volumétrica del suelo (SP-SM):

$$B = \frac{E * G}{3 * (3 * G - E)}$$

$$B = \frac{8610.5 * 3311.73}{3 * (3 * 8610.5 - 3311.73)}$$

$$B = 7175.42 \text{ kPa}$$

OpenSeesPL solicita un cálculo adicional:

El producto de la resistencia al corte no drenado por $\frac{\sqrt{3}}{2}$

$$C = \frac{\sqrt{3}}{2} * C_u$$

$$C = \frac{\sqrt{3}}{2} * 15 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

$$C = 127.39 \text{ kPa}$$

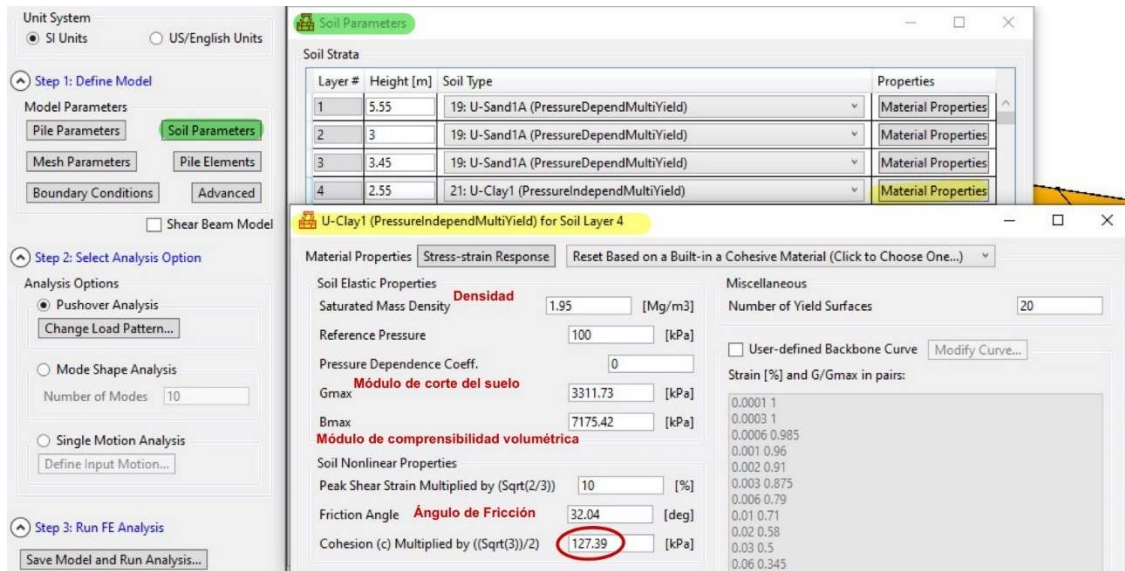


Figura 4.19 Propiedades geotécnicas del Suelo Cohesivo. OpenSeesPL

4.3.4.3 Discretización del Medio

OpenSeesPL permite un modelar el suelo circundante como un todo véase en la Figura 4.20, este criterio sería válido, si y solo si, se tuviera una clasificación de suelo en toda el área que actúa el pilote, para esto se requiere que exista datos de perforaciones colindantes al pilote que muestren una variación de las propiedades geomecánicas, las cuales generarían una variación en los resultados obtenidos.

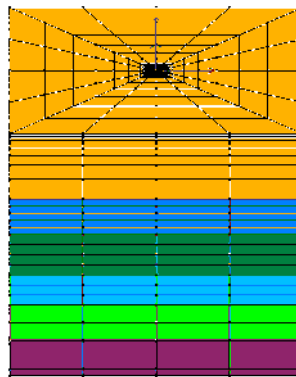


Figura 4.20 Modelo considerando todo el suelo circundante. OpenSeesPL

Para el caso de estudio se fijará solo la mitad del modelo que permite generar OpenSeesPL véase en Figura 4.21, porque se tomará la asunción que el material alrededor del pilote tiene las mismas propiedades geotécnicas.

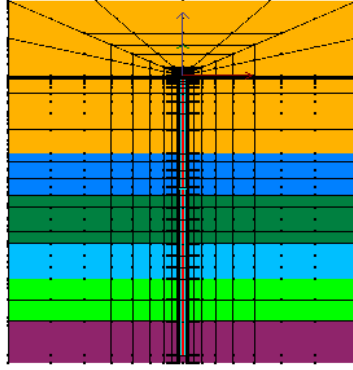


Figura 4.21 Modelo considerando la mitad del suelo circundante. OpenSeesPL

4.3.4.3.1 Malla del Sistema

OpenSeesPL permite realizar el mallado manual del modelo de análisis.

Se consideraron dos tipos de mallado, el primer uniforme Figura 4.22.

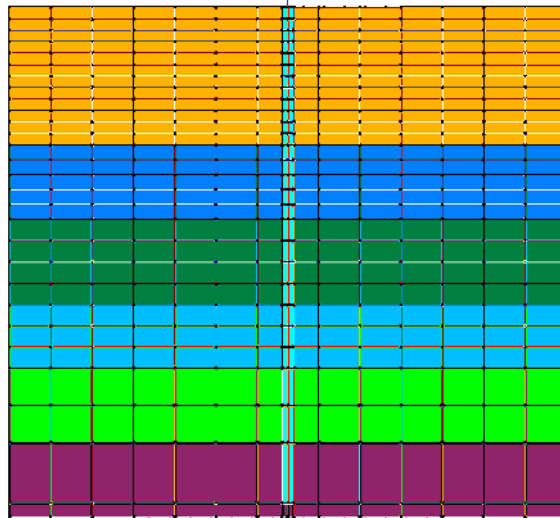


Figura 4.22 Mallado uniforme. OpenSeesPL

El segundo mallado Figura 4.23 analizando el sector donde la concentración de esfuerzos va a ser mayor. Esta zona se encuentra en la cabeza del pilote.

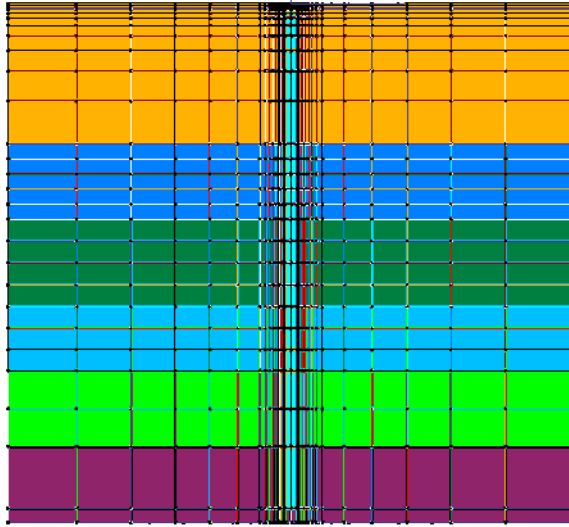


Figura 4.23 Mallado (Concentración de esfuerzos en la cabeza). OpenSeesPL.

Se podría afinar más el modelo, tendría un costo computacional medio a alto, sin embargo, los resultados en el cálculo del modelo mostrarían una ligera variación al obtener la respuesta lateral del pilote.

La discretización final de la malla para este modelo es:

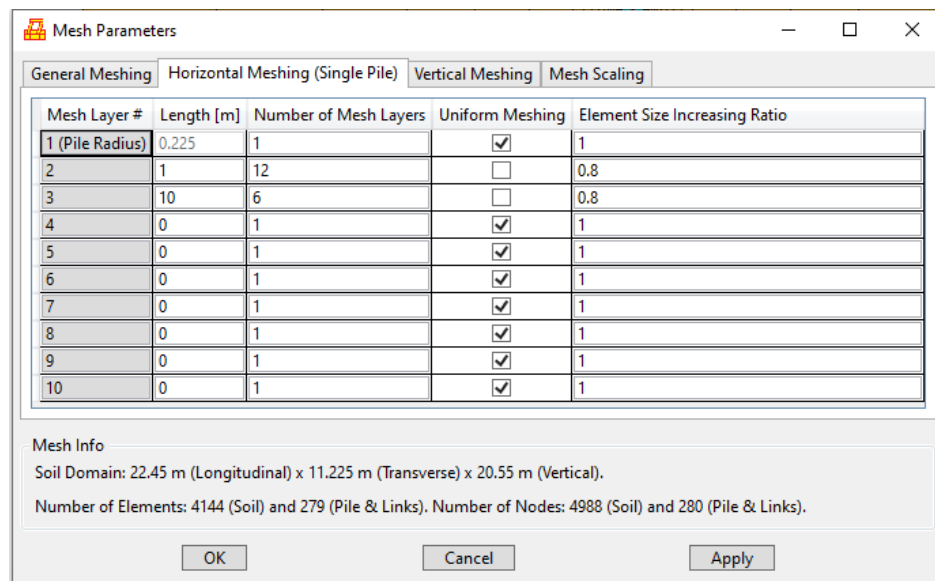


Figura 4.24 Mallado Horizontal. OpenSeesPL

4.3.4.4 Condiciones de Borde del Modelo

Se considerará la capacidad del medio elástico, por el motivo que el suelo circundante tiene las mismas propiedades geotécnicas en todo su manto.

El modelo tomará la consideración de **RigidBox** por que el suelo no se deformará más allá de la zona que exista la mayor concentración de esfuerzos.

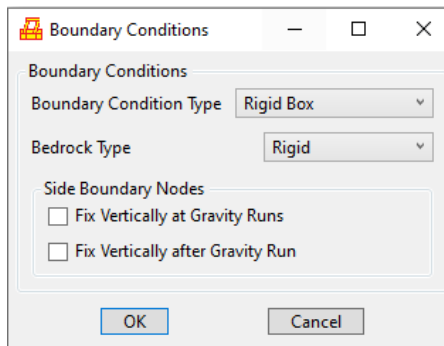


Figura 4.25 Condiciones de Borde del Modelo. OpenSeesPL

4.3.4.5 Carga Lateral

El software permite calcular de dos formas la carga lateral máxima de un pilote, realizando incrementos de carga o fijando el desplazamiento y obteniendo la carga respectivamente. En el caso de estudio ya se fijó un desplazamiento permisible del pilote por consiguiente el programa calculará la carga para tal desplazamiento.

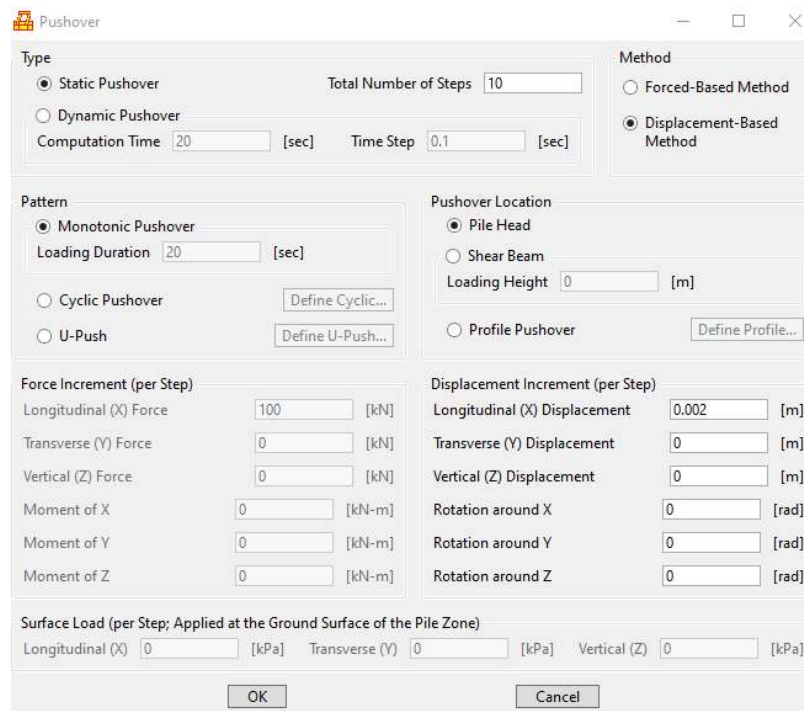
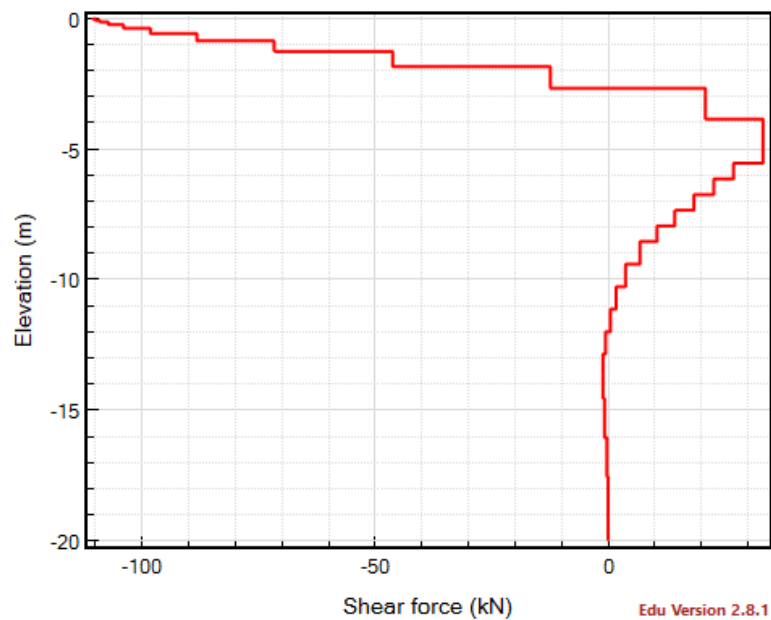
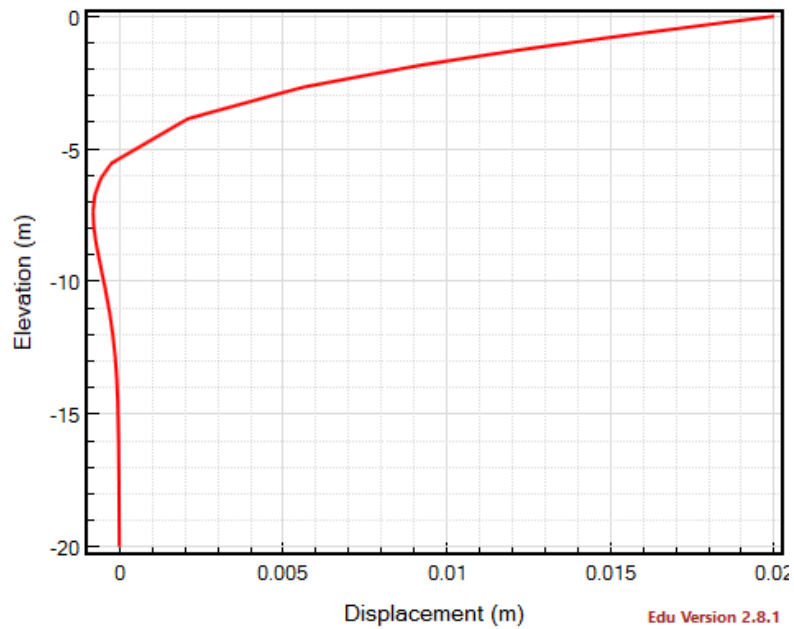


Figura 4.26 Asignación del desplazamiento admisible. OpenSeesPL

La carga máxima aplicada a un pilote de 20 metros de longitud con la condición de cabeza libre es:

P= 11.96 tonf

OpenSeesPL genera graficas que permiten observar el comportamiento del pilote:



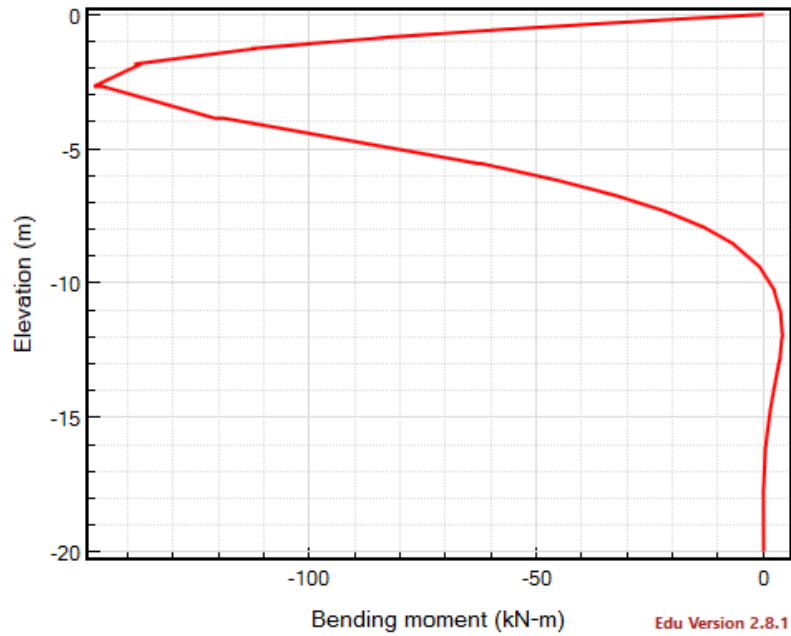


Figura 4.27 Comportamiento del pilote ante una carga lateral. OpenSeesPL.

A continuación, se presenta una tabla resumen donde se aprecia los valores de carga lateral para un desplazamiento de 2cm en pilotes de 8, 12 y 20 metros de longitud en condiciones de cabeza libre y cabeza restringida.

Carga Lateral

Longitud (m)	Cabeza Libre (tonf)	Cabeza Restringida(tonf)
8	11,87	26,33
12	11,96	26,75
20	11,96	26,75

Tabla 4.12 Resumen de Resultados OpenSeesPL.

5 CAPÍTULO V Análisis y Resultados

Para realizar el análisis de los resultados, la investigación muestra graficas donde se visualiza las diferentes longitudes del pilote con la respectiva carga lateral en condiciones libres y fijas en la cabeza del pilote.

5.1 Pilotes de Cabeza Libre

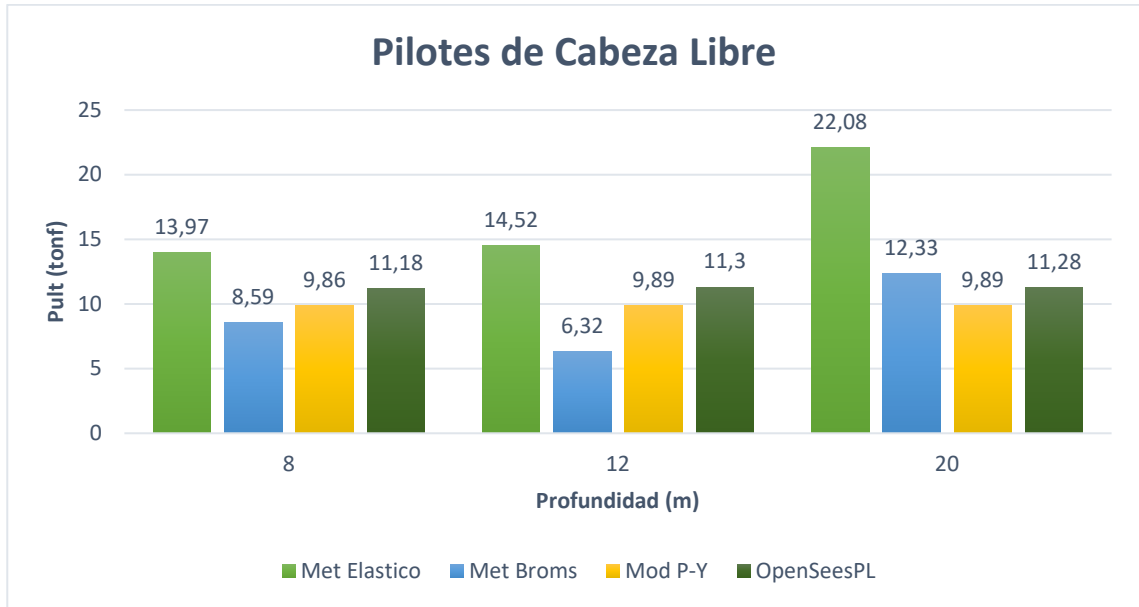


Figura 5.1 Resultados Generales Pilotes de Cabeza Libre

Se agrupó los resultados generales obtenidos de acuerdo con cada solución propuesta: Teoría de Elasticidad, Método de Broms, Curvas P-Y y Elementos Finitos, estimando los valores de carga lateral permisible para pilotes de 8, 12 y 20 metros de longitud como se muestra en la Figura 5.1. Analizando los resultados de las diferentes soluciones, se evidencia que el Método Elástico es muy optimista en el cálculo, a diferencia del Método de Broms, que indica valores de carga lateral permisible más conservadores. En el mismo análisis se incluye las soluciones desarrolladas por curvas P-Y y Elementos Finitos, en efecto tienen una ligera variación de 1.4 tonf, sin embargo, los resultados determinados por dichas metodologías indican valores por debajo de la solución que se determinó por la teoría de elasticidad.

Pilotes de Cabeza Libre P (tonf)

Longitud Pilote (m)	Mét Elástico	Mét Broms	Curvas P-Y	Elementos Finitos
8	13,97	8,59	9,86	11,18
12	14,52	6,32	9,89	11,30
20	22,08	12,33	9,89	11,28

Tabla 5.1 Resumen de resultados general pilotes cabeza libre

5.2 Pilotes de Cabeza Empotrada

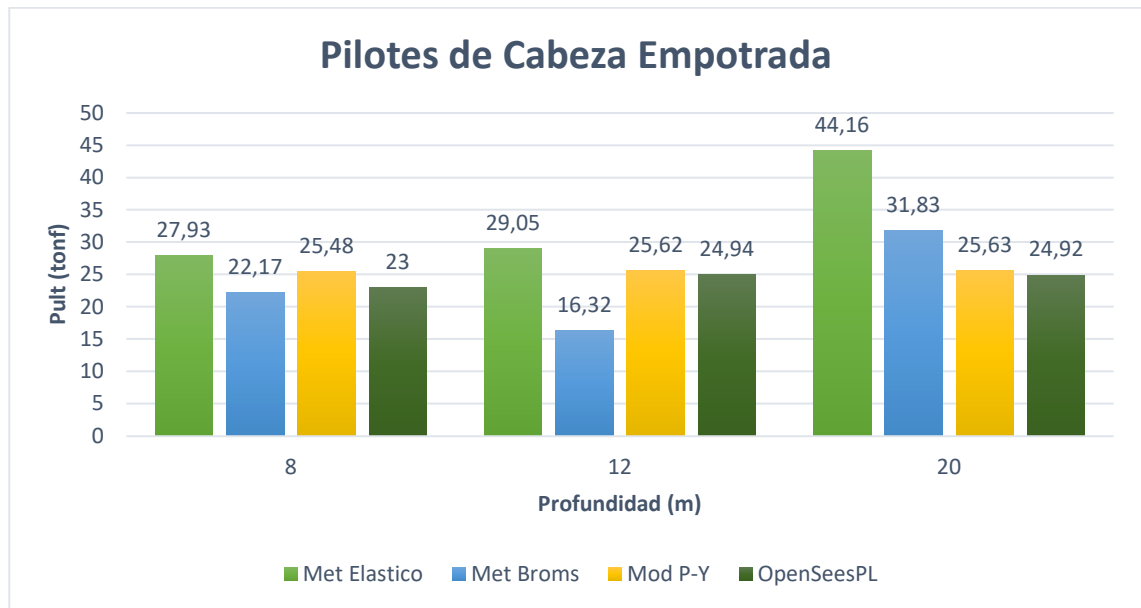


Figura 5.2 Resultados Generales Pilotes de Cabeza Empotrada

En cuanto a los pilotes de cabeza empotrada el comportamiento cambia ligeramente, ahora se puede notar que en los pilotes de 12 metros el valor de carga lateral disminuye notablemente, esto se da por que la constante de reacción del suelo es tomada al 60% debido a la existencia del nivel freático en esa longitud del pilote como indica la Tabla 4.8, por otra parte en pilotes de 20 metros de longitud el Método de Broms determina valores de carga por encima de Curvas P-Y y Elementos Finitos, pero si se observa el pilote de 8 metros de longitud el valor calculado por el Método Elástico es superior que el calculado por el Método de Broms, Curvas P-Y y Elementos

Finitos. Brevemente se puede analizar que para pilotes de cabeza impedida de girar resueltos por curvas P-Y se obtiene valores de carga lateral mayores en comparación a la solución propuesta por elementos finitos, comportamiento opuesto a lo que sucede en el caso de pilotes con cabeza libre.

Pilotes de Cabeza Empotrada P (tonf)

Longitud Pilote (m)	Mét Elástico	Mét Broms	Curvas P-Y	Elementos Finitos
8	27,93	22,17	25,48	23,0
12	29,05	16,32	25,62	24,94
20	44,16	31,83	25,63	24,92

Tabla 5.2 Resumen de resultados general pilotes cabeza empotrada

5.3 Método de Elástico y Método de Broms

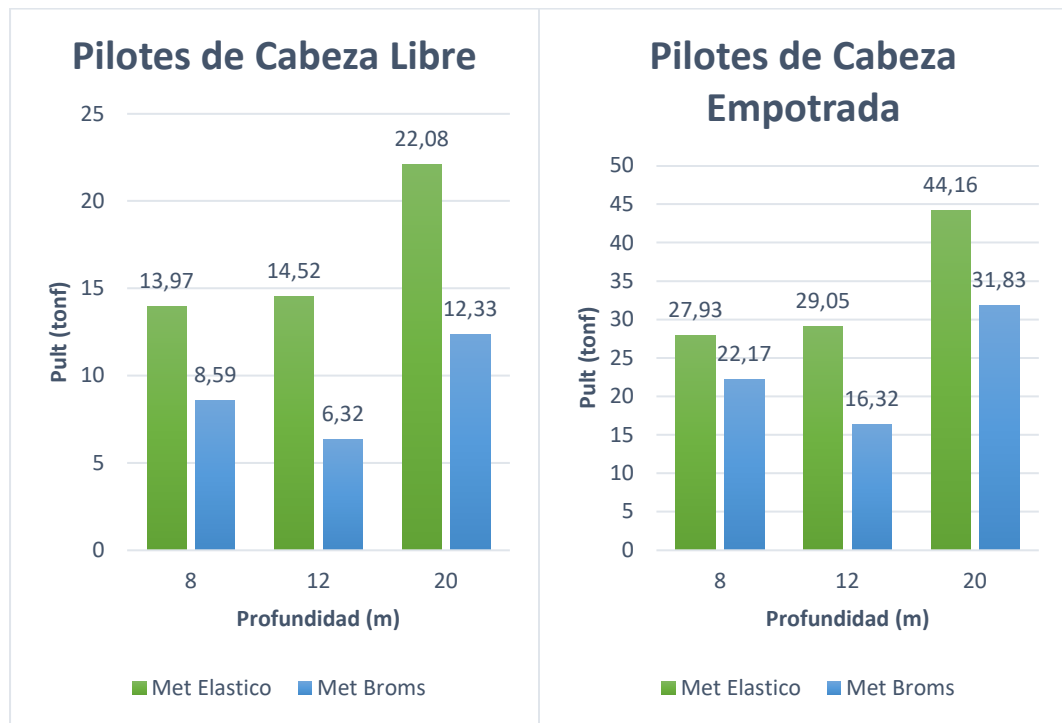


Figura 5.3 Comparativa Mét. Elástico y Mét. Broms Pilotes de Cabeza Libre y Empotrada

Se puede verificar que la carga lateral en los pilotes de 8, 12 y 20 metros de longitud, crece cuando más largo es el pilote. En primer lugar, la afirmación antes

mencionada relaciona el comportamiento del suelo-pilote, en los dos métodos se consideró módulos de reacción para toda la columna de suelo, dado esto, los cálculos mostraron un aumento de constantes de balasto mientras la longitud del pilote crecía, por ejemplo, en el método elástico la constante de balasto tuvo los siguientes valores: 999.47 tonf/m³, 1053.1 tonf/m³ y 1840.81 tonf/m³ en pilotes de 8, 12, y 20 metros de longitud respectivamente. Se tuvo un comportamiento similar en los módulos de reacción del suelo en el método de Broms. Sin embargo, es muy importante analizar la conceptualización del sistema que los métodos consideran, porque la solución que propone, asume que existe un estrato constante (un suelo definido para toda la longitud que desarrolla el pilote), pero la realidad del caso de estudio difiere debido que en la columna estratigráfica se tiene diferentes estratos con sus respectivos espesores tal como indica la Tabla 4.1, por esta razón se buscó un promedio en módulos de reacción del suelo en cada profundidad de desarrollo del pilote, esto quiere decir que en 8, 12 y 20 metros de longitud se calculó un promedio ponderado de Módulo de Elasticidad para luego determinar la respectiva constante de balasto.

5.4 Curvas P-Y y Elementos Finitos

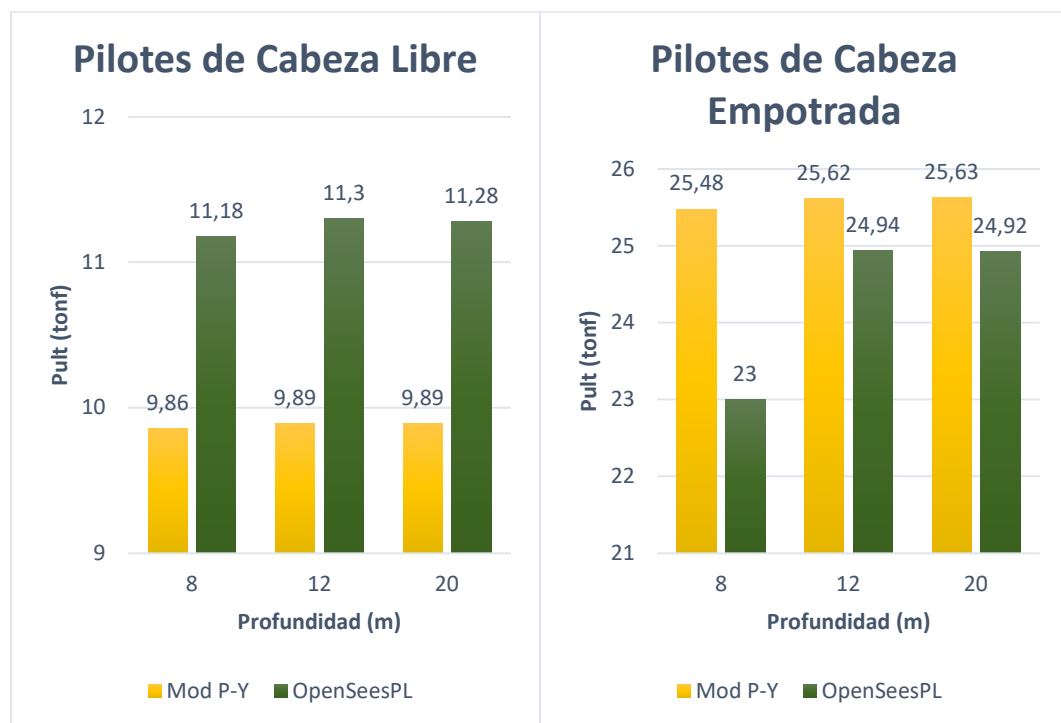


Figura 5.4 Comparativa Mét. Curvas P-Y y Mét Elementos Finitos Pilotes de Cabeza Libre y Empotrada

En primer lugar, se analizará los valores en el caso de pilotes de cabeza libre, los resultados muestran un aumento de carga lateral en la solución de elementos finitos en aproximadamente un 20%, en comparación a los valores obtenidos mediante la solución de curvas P-Y. Mientras si se analiza el caso de pilotes con condición impedida de girar en la cabeza, la variación es mínima en promedio de 4%. Se puede notar que la solución propuesta por Curvas P-Y y Elementos Finitos, desarrolla valores de carga lateral similares, tales soluciones son muy cercanas debido que en los dos métodos si se considera que el pilote se encuentra en un sistema heterogéneo (con diferentes estratos en la columna de suelo) esto quiere decir que al considerar la columna de suelo con toda la clasificación estratigráfica, se tiene valores de parámetros geotécnicos que permiten realizar un análisis más fino del sistema suelo-pilote, sin embargo la variación de resultados radica en que la solución por elementos finitos requiere parámetros más definidos como son Módulos de Corte de cada estrato y Módulo de Compresibilidad Volumétrica, datos que vuelven la solución con una mayor aproximación a un caso real. Es por esta razón a que también se observa un comportamiento lineal de las cargas laterales que interactuar en el pilote, por lo tanto, la resistencia a esfuerzos laterales dependerá de la rigidez del suelo y la rigidez del pilote, mas no dependerá de la longitud del pilote.

5.5 Comportamiento de Pilotes con Solicitación Lateral

La utilización de programas facilita observar el comportamiento de pilotes con carga lateral, en muchos de los casos permitirá entender lo que sucede con el pilote en intervalos de tiempo. En la Figura 5.5 se nota la deformación admisible del pilote dado una carga lateral.

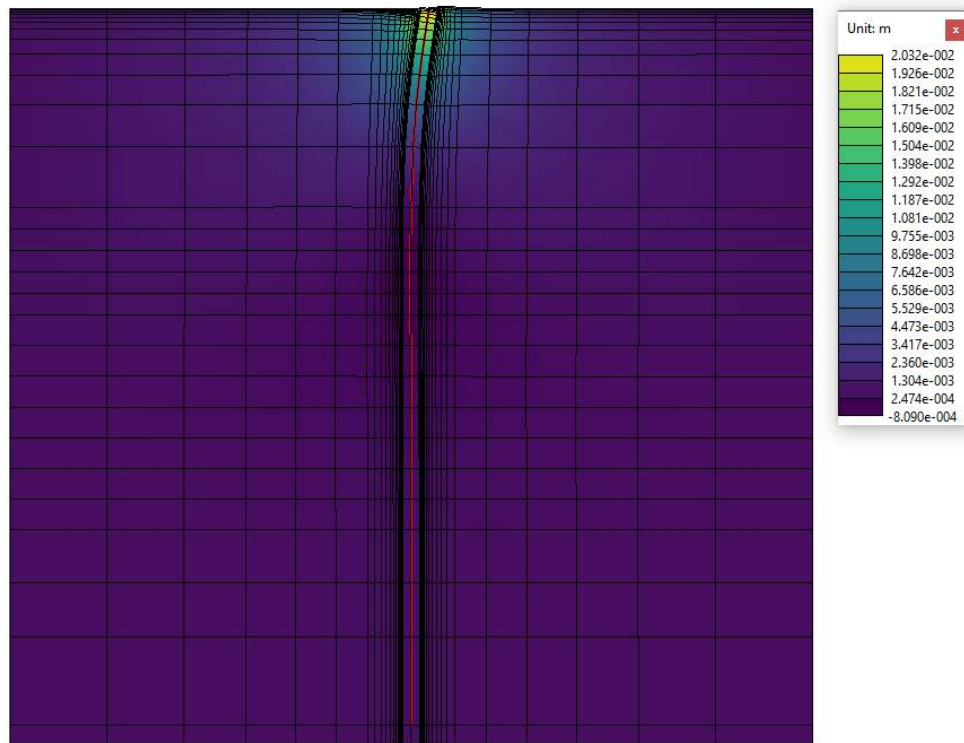


Figura 5.5 Comportamiento ante sollicitación lateral (Pilote cuadrado 20 metros) OpenSeesPL

Se describirá brevemente la interacción suelo-pilote, partiendo del intervalo 0, cuando aún no ocurre ninguna deformación Figura 5.6. El intervalo siguiente Figura 5.7 indica la aplicación total de la carga con una deformación del 50%, se puede notar que la concentración de esfuerzos en la cabeza del pilote es ligera, logrando que el suelo se desplace en el sentido de la carga.

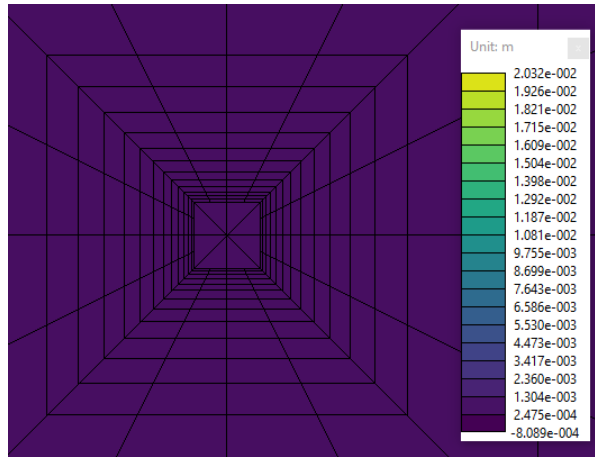


Figura 5.6 Interacción Suelo-Pilote antes que se aplique la carga lateral “vista en planta” OpenSeesPL

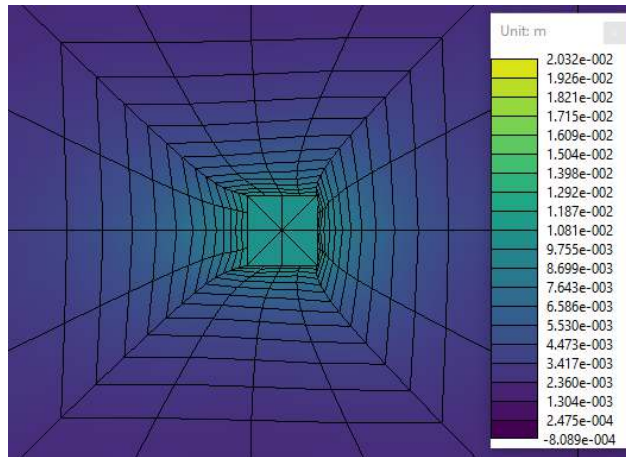


Figura 5.7 Interacción de la carga en el pilote con una deformación del 50% “vista en planta” OpenSeesPL

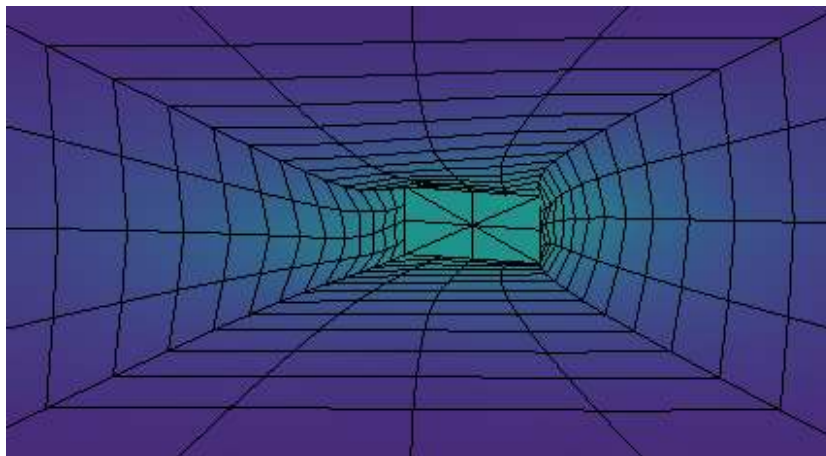


Figura 5.8 Interacción de la carga en el pilote con una deformación del 50% “vista 3D” OpenSeesPL

En la Figura 5.10 la deformación admisible logró el 100%, es evidente que la concentración de esfuerzos en la zona A es mayor y produce un levantamiento del suelo, sin embargo, las concentraciones de esfuerzos generadas en la zona A no afectarán a cimentaciones cercanas, además que los esfuerzos generados por la carga aplicada solo se verán afectados en la cabeza del pilote.

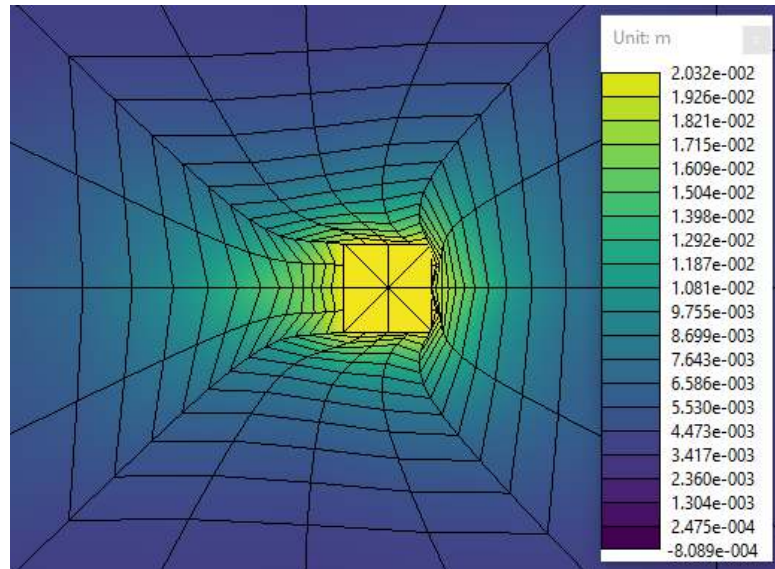


Figura 5.9 Interacción de la carga en el pilote con una deformación admisible (2cm) "vista en planta".
OpenSeesPL

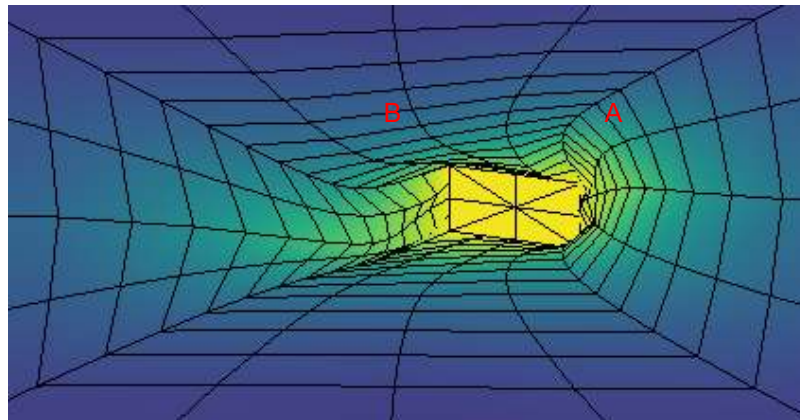


Figura 5.10 Interacción de la carga en el pilote con una deformación admisible (2cm) "vista 3D".
OpenSeesPL

5.6 Comportamiento en Función de la Profundidad

5.6.1 Cabeza Libre

Se ha graficado los 4 métodos de análisis considerando el comportamiento de un pilote de 20 metros de longitud, se observa cuando el pilote tiene su cabeza libre se generan desplazamientos negativos aproximado a 1 milímetro producto de tracciones en el elemento, entre la profundidad de 4 a 14 metros. El método que genera el desplazamiento negativo más alto es la teoría de elasticidad con un valor de 1.3 milímetros, sin embargo, tal desplazamiento se puede despreciar. Se observa que el desplazamiento del pilote tiende a cero cuando el análisis se acerca más a la punta, este comportamiento se puede traducir en que mientras más largo es el pilote tomará una condición de empotramiento en el terreno, y por consiguiente los desplazamientos en la punta tienden a cero.

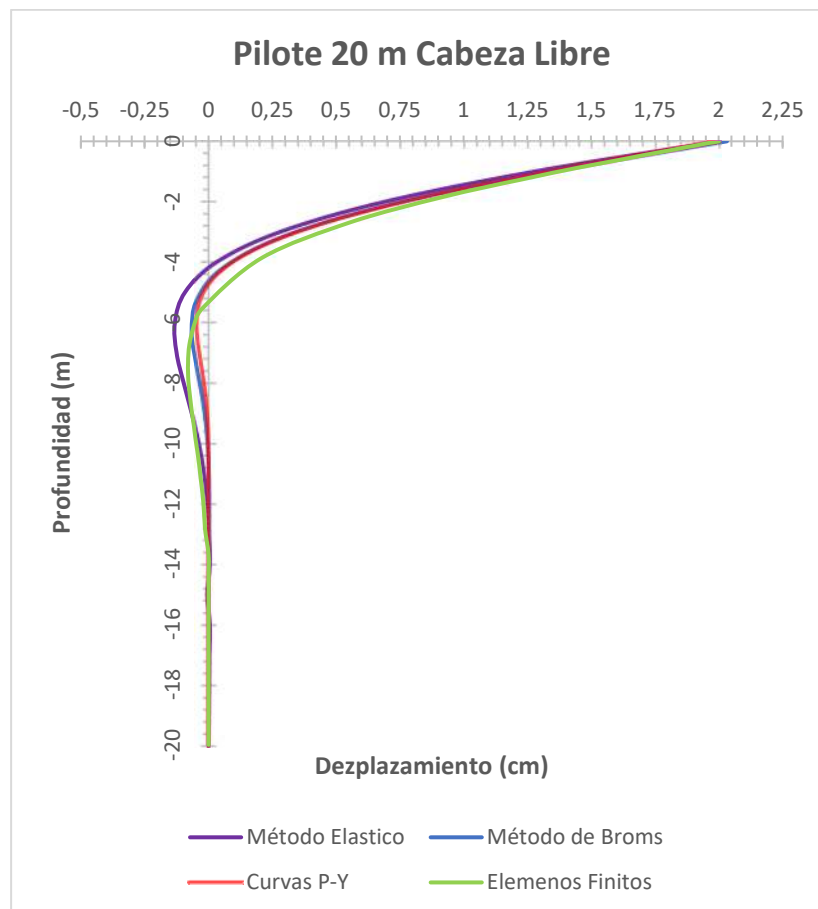


Figura 5.11 Grafica Profundidad vs Desplazamiento (Pilote Cabeza Libre)

5.6.2 Cabeza Empotrada

En el caso de la cabeza impedida de girar, según la gráfica existirán desplazamientos negativos, al cuantificar los desplazamientos dan resultados menores a 1 milímetro, sin embargo tales desplazamientos suceden en la profundidad de 6 a 12 metros, pero en la solución por la teoría de elasticidad las tracciones en el elemento si bien no sobrepasan 1 milímetro son mayores que los otros métodos, además la condición de empotramiento en la cabeza incrementa la resistencia a esfuerzos laterales como se evidencia en los valores calculados por los tres métodos.

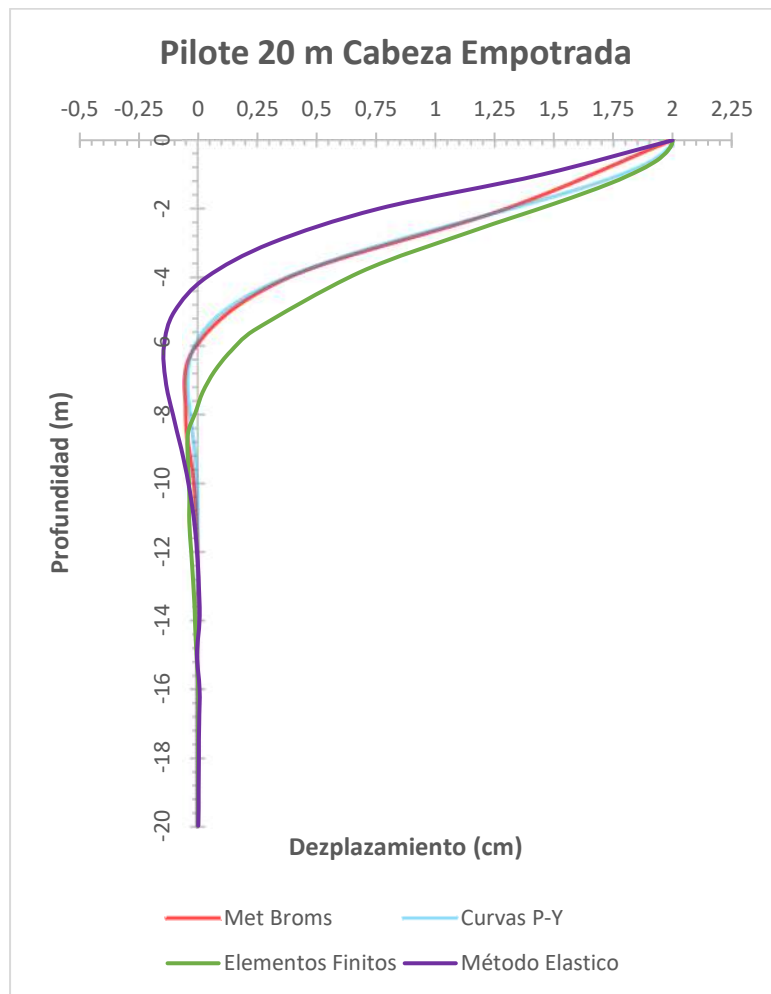


Figura 5.12 Grafica Profundidad vs Desplazamiento (Pilote Cabeza Empotrada)

6 Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

-Es importante realizar un análisis detallado de pilotes con carga lateral, la exactitud de los resultados dependerá de los datos de las características geotécnicas que se disponga del medio, es decir, mientras más datos se tiene para la interpretación del sistema suelo-pilote el análisis tendrá resultados coherentes en la solución, en definitiva los métodos que más datos de entrada necesitan son los métodos de curvas P-Y y Elementos Finitos, siendo el análisis por Elementos Finitos el que considera parámetros con más detalle como: el módulo de corte del suelo y el módulo de compresibilidad volumétrica, por lo tanto, este método es el más recomendable para el análisis y diseño de pilotes con carga lateral.

-Los métodos analizados, teoría de elasticidad y método de Broms indican una creciente respuesta a esfuerzos laterales mientras más largo es el pilote, este principio concuerda con las teorías de Matlock y Reese los dos autores afirman que el coeficiente de balasto se incrementa con la profundidad en suelos granulares, es por esta razón que se tiene valores incrementales de carga lateral en los pilotes de 8, 12 y 20 metros de longitud. Sin embargo en el análisis por Curvas P-Y y Elementos Finitos el comportamiento ante esfuerzos laterales cambia totalmente, mostrando valores constantes de carga lateral independientemente de la longitud del pilote.

-Al analizar las cuatro metodologías de cálculo en pilotes con carga lateral se pudo notar la particularidad de los métodos de Broms y teoría elástica, ambos métodos asumen que el elemento se encuentra en un medio finitamente homogéneo, lo que significa que el pilote interactúa en un solo estrato con las mismas características geotécnicas, al mismo tiempo clasifica las soluciones para suelos cohesivos y no cohesivos, por esta razón se adaptó el caso de estudio, en primer lugar definiendo sobre qué tipo de suelo se realizará el análisis y posterior determinando las características geotécnicas en base a una ponderación de los datos del suelo calculados por correlaciones, en conclusión las características geotécnicas serán determinadas en función a la longitud del pilote.

-Al analizar las cuatro metodologías de cálculo en pilotes con carga lateral se pudo notar la particularidad de los métodos de Broms y teoría elástica, ambos métodos asumen que el elemento se encuentra en un medio finitamente homogéneo, lo que significa que el pilote interactúa en un solo estrato con las mismas características geotécnicas, al mismo tiempo clasifica las soluciones para suelos cohesivos y no cohesivos, por esta razón se adaptó el caso de estudio, en primer lugar definiendo sobre qué tipo de suelo se realizará el análisis y posterior determinando las características geotécnicas en base a una ponderación de los datos del suelo calculados por correlaciones, en conclusión las características geotécnicas serán determinadas en función a la longitud del pilote.

-La validación de parámetros geotécnicos permitió definir una correcta estratigrafía para el análisis de pilotes cargados lateralmente, además que los datos obtenidos, por ejemplo, módulos de elasticidad, módulos de corte del suelo, ángulos de fricción, etc. son muy cercanos a los proporcionados por los ensayos de mecánica de suelos, en conclusión, se puede generar el modelo de una columna estratigráfica con datos de ensayos in-situ mediante correlaciones o ecuaciones empíricas.

6.2 Recomendaciones

-Los parámetros geotécnicos complementarios obtenidos de ecuaciones y correlaciones para el cálculo de las metodologías analizadas en la investigación son de carácter orientativo y se recomienda la respectiva verificación con ensayos de laboratorio. De igual manera es importante determinar una respectiva caracterización de la columna estratigráfica en proyectos donde se utilizará pilotes como cimentación, principalmente en zonas con actividad sísmica constante.

-El diseño de pilotes principalmente busca la estabilidad ante cargas verticales, sin embargo, el análisis se debería realizar considerando cargas horizontales con igual importancia, evaluando el comportamiento suelo-pilote con una metodología adecuada y que permita entender el sistema. Es así que por medio de esta investigación se recomienda la utilización de los modelos P-Y y Elementos Finitos para la verificación de desplazamientos horizontales en pilotes con sollicitación lateral.

-En el presente documento se analizó cuatro metodologías, cada una con consideraciones y soluciones particulares, siempre y cuando cumplan con la conceptualización del entorno que rige cada método; esto quiere decir que en el caso de la teoría elástica y método de Broms, los resultados obtenidos pueden tomarse como una verificación adecuada y orientada a prediseños, por otra parte el método de curvas P-Y y elementos finitos al estimar soluciones en un entorno más fino permiten verificar diseños definitivos. La recomendación propuesta en el presente estudio en base a los resultados obtenidos es utilizar la solución por elementos finitos ya sea como prediseño y verificación de un diseño definitivo en cimentaciones piloteadas, además al hacer el análisis por elementos finitos se podría verificar y entender el comportamiento de cargas verticales y horizontales en un mismo sistema, debido a la existencia de programas que permiten un modelamiento cercano a un caso real.

Bibliografía

Bowles, J. (1997). *Foundation Analysis and Desing*. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.

Braja M. Das. (2011). *Pilotes de Concreto [Fotografía]* (7 ed.). CENGAGE.

Broms, B. (1964). *Lateral resistance of piles in cohesionless soils. Journal of the soils mechanics and foundations division. [Fotografía]*.

Broms, B. (1964). *Lateral resistance of piles in cohesive soils*.

Broms, B. (1964). *Lateral resistance of piles in cohesive soils. Journal of the soils mechanics and foundations division.[Fotografía]*.

Chellis, R. (1971). *Pile Foundations*. McGraw Hill Book Company Inc.,.

Chiriboga , F., & Mauro , M. (Enero de 2018). Evaluacion de la interacción suelo-pilote prebarrenado bajo carga laterlal en suelos licuables. Quito.

Codocsa S.A. (2016). *Pilotes Metalicos [Fotografía]*. Obtenido de CODOCSA : <http://codocsa.com/es/Project/detail/125/summary>

Das, B. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Cengage Learnig .

Granda Rosales, N., & Vallejo Moscoso, A. (2016). DISEÑO Y ANÁLISIS DE PILOTES EN EL PROYECTO SUBLÍNEA DE DISTRIBUCION QUEVEDO-MOCACHE. Quito, Pichincha, Ecuador. Obtenido de <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/12646/DISE%C3%91O%20Y%20AN%C3%81LISIS%20DE%20PILOTES.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Hannigan, P., Globe, G., Likins, G., & Rausche, F. (2006). *Design and Construction of Driven Pile [Fotografía]*. Washington, D.C.

Hannigan, P., Globe, G., Linkins, G., & Rausche, F. (Abril de 2006). *Pilotes de Madera [Fotografía]*. Obtenido de Design and Construction of Driven Pile Foundations.

Jimenez Salas, J. (1981). *Geotecnia y Cimientos II*. Madrid: Rueda.

- Jiménez Salas, J. (1981). *Pilote Compuestos [Fotografía]* (Vol. 2). Madrid, España: Rueda.
- Juares Badillo, E., & Rico Rodriguez, A. (1973). *Teoría y aplicaciones de la Mecánica de Suelos* (Vol. Tomo II). Mexico: Limusa.
- Kulhawy, F., & Mayne, P. (1990). *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Desing*. New York.
- Manual de Carreteras de Chile "Instrucciones y Criterios de Diseño"* (Vol. 3). (2017). Chile.
- Matlock, H. (1970). *Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay*. Proceedings 2nd Offshore Technology Conference.
- Mejias Leiva, A. (2010). *Recomendaciones para la modelacion por el Método de Elementos Finitos[Fotografía]*.
- Mejias Leiva, A. (2010). Recomendaciones para la modelación por el Método de los Elementos Finitos. Obtenido de <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/5782/C10061.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- P. Coduto, D. (2001). *Foundation Design Principles and Practices* (Segunda ed.). Reese. (2000). [Fotografía].
- Reese, L., Cox, W., & Koop, F. (1974). *Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand*. 6th Offshore Technology Conference.
- Sainea Vargas, C. (2011). *Análisis de grupos de pilotes sometidos a cargas de sismo*. Colombia.
- Salamanca Medina, E., & Abril Gonzáles , N. (Julio de 2017). MODELAMIENTO FÍSICO A ESCALA DE PILOTES INDIVIDUALES, DE CABEZA LIBRE, SOMETIDOS A CARGA LATERAL EN SUELOS COHESIVOS. *Ingeniería Investigacion y Desarrollo*, 17(2).
- Silva, A. (2015). *Contrucciones II [Fotografía]*.

- Taylor, D. (1960). *Fundamentals of Soil Mechanics*. New York.
- Taylor, D. (1960). *Fundamentals of soil mechanics*[Fotografía]. New York: John Wiley & Sons.
- Terzagui, K., & Peck, R. (1948). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (1st ed.). New York: John Wiley and Sons.
- Torres, A., Ramos Cañon, A., Prada Sarmiento, F., & Botía-Díaz, M. (2016). Comportamiento mecánico de juntas frías lisas de concreto.
- Turello, D., Pinto, F., & Sanchez, P. (2014). MODELACIÓN DE LA INTERACCIÓN SUELO-PILOTE EN PILOTES CARGADOS LATERALMENTE MEDIANTE ELEMENTOS DE VIGA EMBEBIDOS EN SÓLIDOS. *ASOCIACIÓN ARGENTINA DE MECÁNICA COMPUTACIONAL*.
- Turello, D., Pinto, F., & Sanchez, S. (2014). MODELACIÓN DE LA INTERACCIÓN SUELO-PILOTE EN PILOTES[Fotografía].
- Ruge Cárdenas, Juan Carlos, & Pinto da Cunha, Renato, & Rondón Quintana, Hugo Alexander (2014). SIMULACIÓN DE PRUEBAS DE CARGA EN PILOTES USANDO UN MODELO CONSTITUTIVO HIPOPLÁSICO. *Revista EIA*, 11(21),171-183. [fecha de Consulta 23 de Mayo de 2021]. ISSN: 1794-1237. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149233913015>

Anexos