

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

GRUPOS DE PILOTES SOMETIDOS A CARGA LATERAL

Deicy Paola Murcia Dávila

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería Departamento ingeniería civil y agrícola
Bogotá, Colombia

2023

GRUPOS DE PILOTES SOMETIDOS A CARGA LATERAL

Deicy Paola Murcia Dávila

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial
para optar al título de:

Magíster en Ingeniería-Geotecnia

Director:

Msc. Félix Hernández Rodríguez

Línea de Investigación:

Análisis de problemas geotécnicos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería Departamento ingeniería civil y agrícola
Bogotá, Colombia
2023

*A mi hermano, su vida fugaz, su
memoria eterna.*

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Deicy Paola Murcia Dávila

Fecha 30/01/2023

Agradecimientos

Expreso gratitud hacia mi hijo Sebastián por el amparo y el ímpetu que experimento solo al ver sus ojos color cielo gris, los cuales me han acompañado más de la mitad de mi vida. Agradezco a Camilo mi compañía y apoyo, quien con su calidez me abraza y me enseña a soñar rosas. Reconozco y valoro el trabajo del ingeniero Félix Hernández Rodríguez mi director y amigo, por cada tinto que nos tomamos junto con las largas y entretenidas conversas, en las cuales no solo me compartió su sabiduría si no que escuchó atento mis inquietudes y las resolvió con atención y cuidado. Le agradezco a mi familia por desear lo mejor para mí. Bueno y me agradezco a mí por ponerme esta meta.

Resumen

Grupos de pilotes sometidos a carga lateral

En este trabajo final de maestría se implementó el método de elementos finitos con el fin de estudiar la influencia que ejerce un pilote sometido a carga lateral sobre los pilotes adyacentes en un grupo, para esto se evaluó la incidencia de la posición de un pilote dentro de un grupo sobre las fuerzas cortantes, los momentos flectores y las fuerzas de reacción del suelo. Los modelos se ensamblaron de tal manera, que los pilotes se pudieron estudiar como elementos tridimensionales volumétricos y se simuló su interacción con un suelo de fundación arenoso, además se implementaron adaptaciones a los modelos que permitieron obtener de forma directa los diagramas de fuerza cortante y momento flector del pilote, entendido como un elemento unidimensional estructural tipo viga. Los análisis realizados cobran importancia en el estudio de los sistemas de reacción requeridos para los cables de puentes colgantes y atirantados, de las estructuras de contención, de las plataformas marítimas o los sistemas de cimentación para aerogeneradores *offshore* y de un buen número de obras portuarias.

Se observó que, en grupos de pilotes unidos con una viga cabezal el pilote cargado lateralmente presenta bajas reacciones puesto que, al trabajar como grupo, buena parte de la carga aplicada se distribuye en la fricción que se desarrolla en las caras verticales perimetrales al grupo y en la cara de la base, al igual que al frente de los pilotes delanteros. Se obtuvo que, las fuerzas de reacción del suelo alrededor de los pilotes pueden ser menores a las que se obtienen en un pilote aislado, porque se presentan efectos de sombra o de borde. Se concluyó que, la interacción entre pilotes de un grupo es función de la separación entre pilotes y del ángulo de partida y está fuertemente influenciada por las condiciones de restricción en el cabezal.

Con respecto al uso del programa de elementos finitos, se encontró que el uso de este tipo de herramientas implica la implementación de adaptaciones a los modelos, con el fin de lograr un grado de verosimilitud aceptable entre los resultados obtenidos y lo que se espera del sistema en cuanto a su comportamiento real.

Palabras clave: (Elementos finitos, interacción suelo-estructura, módulo de reacción, factor de influencia, ángulo de partida, curva p-y).

Abstract

Groups of piles subjected to lateral load

In this final master thesis, the finite element method was implemented to study the influence of a pile subjected to lateral load on adjacent piles in a group. For this purpose, the incidence of the position of a pile within a group on shear forces, bending moments and soil reaction forces was evaluated. The models were assembled in such a way that the piles could be studied as three-dimensional volumetric elements and their interaction with a sandy foundation soil was simulated. In addition, adaptations to the models were implemented that allowed obtaining directly the shear force and bending moment diagrams of the pile, understood as a one-dimensional beam-type structural element. The analyses performed are important in the study of reaction systems required for suspension and cable-stayed bridge cables, retaining structures, offshore platforms or foundation systems for offshore wind turbines and a number of port works.

It was observed that, in groups of piles joined with a pile cap beam, the laterally loaded pile shows low reactions since, when working as a group, a good part of the applied load is distributed in the friction that develops on the vertical faces perimeter to the group and on the face of the base, as well as on the front of the front piles. It was obtained that, the soil reaction forces around the piles can be lower than those obtained in an isolated pile, because shadow or edge effects are present. It was concluded that the interaction between piles in a group is a function of the pile spacing and the departure angle and is strongly influenced by the restraint conditions at the pile's head.

Regarding the use of the finite element program, it was found that the use of this type of tools implies the implementation of adaptations to the models, in order to achieve an acceptable degree of plausibility between the results obtained and what is expected from the system in terms of its real behavior.

Keywords: (Finite elements, soil structure interaction, reaction modulus, influence factor, departure angle, p-y curve).

Índice general

Resumen	V
Lista de figuras	IX
Lista de tablas	XIII
Lista de símbolos y abreviaturas	XIV
Introducción	1
1. INFLUENCIA ENTRE PILOTES SOMETIDOS A CARGA LATERAL	3
1.1. Interacción entre pilotes bajo carga lateral	3
1.2. Capacidad de un pilote sometido a carga lateral	5
1.2.1. Aproximación estática convencional	5
1.2.2. Aproximación de Brinch Hansen	6
1.2.3. Teoría de Broms	7
1.2.3.1. Pilotes Cortos, cabezal libre, suelo granular	8
1.2.3.2. Pilotes Cortos, cabezal libre, suelo cohesivo	9
1.2.3.3. Pilotes largos con cabezal restringido	10
1.2.4. Capacidad portante de grupos	12
1.2.4.1. Falla en bloque para grupo de pilotes en suelo granular .	12
1.2.4.2. Falla en bloque para grupo de pilotes en suelo cohesivo .	13
1.2.5. Concepto de Eficiencia	14
1.3. Análisis de desplazamientos de pilotes cargados lateralmente	16
1.3.1. Análisis elástico -Método de los factores de interacción	17
1.3.2. Relaciones carga desplazamiento o Curvas p-y	19
1.3.3. Método de los elementos de contorno (Boundary Element Method) BEM	20
1.3.4. Desplazamiento lateral en grupos de pilotes	22
1.4. Datos experimentales sobre grupos de pilotes ante carga lateral	29
1.5. Método de elementos Finitos	35
2. MODELO DE ANÁLISIS EN ELEMENTOS FINITOS	37
2.1. Dimensiones de los pilotes	37
2.2. Descripción del modelo 3D	39
2.3. Ecuaciones de los elementos	40
2.4. Malla de elementos finitos	41
2.5. Condiciones de Frontera del modelo	42

2.6. Condiciones iniciales	43
2.7. Etapas de Carga	44
2.8. Verificación del tamaño del modelo	44
2.9. Adaptaciones a la malla de elementos finitos	45
2.10. Esfuerzos horizontales en el suelo que rodea el pilote	47
2.11. Calibración experimental	50
3. INFLUENCIA DE UN PILOTE CARGADO LATERALMENTE SOBRE LOS PILOTES ADYACENTES EN UN GRUPO	53
3.1. Ecuación de la viga	54
3.2. Efecto de la separación entre pilotes	57
3.3. Efecto del Ángulo de partida β	63
3.4. Efecto de la viga cabezal	66
3.5. Curvas p-y	74
3.6. Módulos de reacción horizontal	79
4. CONCLUSIONES	81
Bibliografía	85

Índice de figuras

1.1. Interacción entre pilotes, efecto borde, efecto sombra y zona de brecha	4
1.2. Geometría de grupo de pilotes	4
1.3. Pilote individual sometido a carga lateral, aproximación estática	6
1.4. Factores de resistencia lateral K_q, K_c , Brinch Hansen (1961)	7
1.5. Mecanismo de falla y reacción del suelo para pilotes con cabezal libre, suelo granular	8
1.6. Mecanismo de falla y reacción del suelo para pilotes con cabezal libre, suelo cohesivo	10
1.7. Mecanismo de falla en pilotes largos con cabezal restringido	11
1.8. Bloque de falla crítico de grupo de pilotes cargados lateralmente	12
1.9. Falla en grupo de Pilotes bajo carga lateral	13
1.10. Esquema en planta de grupo de Pilotes bajo carga lateral, valores de eficiencia recomendados	16
1.11. Pilote cargado lateralmente, discretización método de factores de interacción	17
1.12. Curva p-y	19
1.13. Esquema de un pilote individual bajo carga lateral y momento, discretización BEM	20
1.14. Problema de Mindlin para carga lateral en un semi espacio elástico	21
1.15. Método de los factores de interacción extendido para un grupo de 2 pilotes	23
1.16. Variación del factor de interacción entre un par de pilotes i,j; como función del ángulo de salida β	24
1.17. Gráficas de Factores de interacción α_p para pilote con cabeza fija. Pilote flexible (Izquierda) y Pilote Rígido (Derecha)	25
1.18. Curva p-y para pilote individual y Curva p-y para pilote en un grupo	26
1.19. Definición de dirección de la carga y espaciado entre pilotes para efectos de grupo	27
1.20. Comportamiento carga lateral -deflexión de grupo de 10 pilotes, experimentos de Matlock et al. (1980)	30
1.21. Variación de momento flector a profundidad de grupo de 10 pilotes, experimentos de Matlock et al. (1980)	31
1.22. Momento flector con relación a la carga horizontal aplicada, experimentos Selby y Poulos (1984)	32
1.23. Gráficas de carga desplazamiento lateral, experimentos de Brown et al. (1988)	33
2.1. Diagrama de presiones del pilote, aplicación de la metodología de Brinch Hansen (1961)	38
2.2. Elemento tetraédrico de 10 nodos	40

2.3. Región refinada de la malla de elementos finitos	42
2.4. Condiciones de Frontera	43
2.5. Etapas de carga	44
2.6. Esfuerzos horizontales en la frontera del modelo para todas las etapas de análisis	45
2.7. Esfuerzos verticales al frente del pilote cargado lateralmente	46
2.8. Carga lateral en pilote individual: Estado de esfuerzos en el suelo que circunda el pilote	47
2.9. Carga lateral en pilote individual: Esfuerzos horizontales en el suelo que circunda el pilote	49
2.10. Modelo de elementos finitos para reproducir la prueba de carga del puente Roosevelt	51
2.11. Momento flector a lo largo del pilote, datos experimentales y datos de modelación	52
2.12. Curva carga deflexión, datos experimentales y modelación	52
3.1. Localización de nodos en la interfaz suelo-pilotes y cálculo de la fuerza de reacción del suelo	54
3.2. Ecuación de la viga y diagramas de fuerza cortante, momento flector y reacción	56
3.3. Diagramas de cortante y momento flector en el Pilote 1, modelos con diferente separación Centro a Centro	57
3.4. Carga contra momento flector máximo desarrollado en el pilote 1, modelos con diferente separación centro a centro	58
3.5. Relación de fuerzas cortantes y momentos flectores en Pilotes, modelos con diferente separación Centro a Centro	59
3.6. Relación de magnitud de momentos flectores máximos contra separación normalizada de los pilotes	59
3.7. Separación normalizada entre pilotes contra la profundidad normalizada del momento flector máximo en el pilote 2	60
3.8. Reacción en el pilote 2 contra separación normalizada entre pilotes	61
3.9. Carga deflexión normalizada en el cabezal del pilote 2	61
3.10. Carga contra momento flector máximo desarrollado en el pilote 2, modelos con diferente separación Centro a Centro	62
3.11. Esquema de modelos variando ángulo β	63
3.12. Diagramas de cortante y momento flector en el Pilote 1, modelos con diferente ángulo β	64
3.13. Diagramas de cortante y momento flector en pilotes, modelos con diferente ángulo β	64
3.14. Profundidad normalizada del momento flector máximo en el pilote 2 contra ángulo de partida	65
3.15. Carga desplazamiento en el cabezal del pilote 2, modelos con diferente ángulo β	66
3.16. Esquema del modelo de pilotes con viga en el cabezal	67
3.17. Diagramas de cortante y momento flector en el Pilote 1, modelos con viga cabezal	68
3.18. Carga contra momento flector máximo desarrollado en el pilote 1, modelos con cabezal restringido	68

3.19. Planos para evaluación de esfuerzos cortantes	69
3.20. Diagramas de cortante y momento flector en el Pilote 2, modelos con cabezal restringido	70
3.21. Carga desplazamiento en el cabezal del pilote 2, modelos con viga en el cabezal	71
3.22. Relación de reacciones de los pilotes, modelos con viga en el cabezal	71
3.23. Diagrama de reacciones en los pilotes 1 y 2, modelos con viga en el cabezal	72
3.24. Detalle de las regiones del suelo alrededor de los pilotes en etapa de carga, modelos con viga en el cabezal	73
3.25. Ilustración esquemática de relaciones carga-desplazamiento a profundidad	74
3.26. Curva p-y para pilote 1, modelos con cabezal libre	74
3.27. Curva p-y en el cabezal del pilote 2, modelos con cabezal libre	75
3.28. Curva p-y en la base del pilote 2, modelos con cabezal libre	76
3.29. Multiplicador p-y para pilote 2, modelos con cabezal libre	76
3.30. Curva p-y para pilote 1, modelos con viga en el cabezal	77
3.31. Curvas reacción -desplazamiento en el cabezal del pilote 1, modelos con viga en el cabezal y diferentes separaciones entre pilotes	78
3.32. Curvas reacción -desplazamiento en el cabezal del pilote 2, modelos con viga en el cabezal y diferentes separaciones entre pilotes	78
3.33. Fuerza de reacción del suelo en pilote 1 contra desplazamiento horizontal, estimación de módulos de reacción horizontal	79
3.34. Estimación de módulos de reacción horizontal en pilote 1	80
3.35. Estimación de módulos de reacción horizontal en pilote 2	80

Índice de tablas

1.1. Multiplicadores para curvas p-y	28
2.1. Cálculo del diagrama de presiones del pilote, aplicación de metodología Brinch Hansen (1961)	37
2.2. Propiedades del suelo	39
2.3. Funciones de forma de elementos tetraédricos	40

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Nombre	Unidad SI
A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}	Factores de la solución de Mindlin	ad
a	Separación de pilotes en la dirección de aplicación de la carga	m
c'	Cohesión efectiva	kPa
C_u	Resistencia al corte no drenado	kPa
D	Diámetro de pilote	m
E'	Módulo Elástico	MPa
e	Excentricidad	m
e	Relación de vacíos	ad
E_p	Modulo elástico del material del pilote	MPa
f_m	Multiplicadores para curvas p-y	ad
I_p	Inercia de la sección transversal del pilote	m^4
K_0	Coefficiente de presión de tierras en reposo	ad
K_a	Coefficiente activo de presión de tierras	ad
K_q, K_c	Factores de Brinch Hansen	ad
K_p	Coefficiente pasivo de presión de tierras	ad
K_R	Rigidez relativa del pilote respecto al suelo circundante	ad
L	Longitud de pilote	m
M	Momento flector	kN m
M_y	Momento de fluencia de la sección	kN m
N_i	Funciones de interpolación o de forma	–
n	Número de veces / número de elementos	–
P1	Pilote 1	–
P2	Pilote 2	–
P	Fuerza de reacción por unidad de longitud	kN/m
P_u	Resistencia última por unidad de área frontal de pilote	kN/m^2
P_w	Presión de poros	kPa
Q	Carga aplicada	kN
Q_{ult}	Carga última	kN
s	Separación centro a centro, espaciamiento de los pilotes	m
V	Fuerza cortante	kN/m
Z_{Mmax}	Profundidad a la que ocurre el momento flector máximo del pilote	m
Z_r	Punto de giro	m

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Nombre	Unidad SI
β	Ángulo entre el vector de carga y la línea que conecta dos pilotes	°
γ	Peso unitario	kN/m ³
ε_{50}	Deformación al 50 % del esfuerzo de falla en ensayo de compresión triaxial	%
η	Eficiencia de grupo ante carga axial	ad
η_L	Eficiencia de grupo ante carga lateral	ad
ψ	Dilatancia	°
ρ_p	Desplazamientos del pilote	m
ρ_s	Desplazamientos del suelo	m
σ_{zz}, σ_v	Esfuerzo vertical total	kPa
σ'_{zz}	Esfuerzo vertical efectivo	kPa
σ'_{xx}	Esfuerzo horizontal	kPa
σ_{zis}	Esfuerzo vertical total in-situ	kPa
τ_s, τ_{xy}	Fricción que se desarrolla en las caras del bloque de falla	kPa
ϕ'	Ángulo de fricción	°
ϕ^e	Función de aproximación de un elemento	–
ϕ_i	Valor nodal de la función de aproximación en el nodo i	–
ω	Humedad natural del suelo	%

Introducción

En muchas circunstancias de la ingeniería civil, se debe proveer de estructuras aptas para soportar cargas laterales de importancia. Tal es el caso de los sistemas de reacción requeridos para los cables de puentes colgantes y atirantados, de las estructuras de contención, de las plataformas marítimas o los sistemas de cimentación para aerogeneradores *offshore* y de un buen número de obras portuarias. El diseño de estas cimentaciones debe garantizar las medidas necesarias para que las estructuras soporten de manera segura las solicitaciones sísmicas, los impactos y los empujes horizontales, además de las fuerzas verticales. Cuando los suelos superficiales no son lo suficientemente competentes para soportar esas cargas horizontales, porque llegarían a su condición de fluencia, se debe recurrir a las cimentaciones profundas: pilas, pilotes, *caissons* y similares.

Los pilotes son una solución de cimentación que usualmente se implementa en grupos. Si los pilotes en un grupo que soporta carga lateral están poco espaciados, se influenciarán mutuamente debido a la interacción pilote-suelo-pilote, esto se traduce en una serie de efectos de grupo que han sido estudiados, para los cuales la evidencia experimental es escasa, pero supera en cantidad las metodologías analíticas existentes. Los problemas de interacción entre pilotes son más evidentes en grupos pequeños de pilotes. Un efecto de grupo importante es la reducción de la capacidad de carga de un pilote individual debida a la cercanía de pilotes adyacentes, lo que da como resultado que el grupo tenga una capacidad de carga inferior a la suma de las capacidades de todos los pilotes que conforman el grupo, es necesario comentar que este efecto no es relevante en pilotes hincados en arenas sueltas. En un grupo de pilotes sometidos a carga lateral, las magnitudes de las fuerzas cortantes y los momentos flectores que se desarrollan en los pilotes varían de acuerdo con la posición relativa del pilote evaluado y el punto y dirección de aplicación de la carga, este efecto tiene relevancia sobre el diseño del refuerzo estructural.

En este trabajo final se busca estudiar la influencia que ejerce un pilote sometido a carga lateral sobre los pilotes vecinos en un grupo de pilotes mediante el uso de métodos numéricos basados en elementos finitos. Para lo anterior se plantean e implementan adaptaciones a los modelos de elementos finitos para simular el problema de pilotes cargados lateralmente, la verificación de los modelos se hace mediante la comparación con resultados experimentales que se encuentran de la literatura sobre el tema de pilotes ante carga lateral. Luego, con el fin de estudiar la influencia entre pilotes, se proponen diferentes configuraciones geométricas entre dos pilotes y se obtienen los diagramas de fuerza cortante y momento flector de los pilotes para esas configuraciones. Además, se estimaron los módulos de reacción horizontal a través del cálculo de las fuerzas de reacción horizontal en la interfaz suelo-pilotes.

Las modelaciones permitieron simular los pilotes como un elemento tridimensional y fue posible analizar la interacción que ocurre entre los pilotes y el suelo circundante. Se implementaron adaptaciones a los modelos con el fin de simular la interacción suelo-estructura, además se implementó el uso de elementos tipo viga con el objeto de obtener de forma directa las magnitudes de las fuerzas cortantes y los momentos flectores que se desarrollan en los pilotes ante la carga aplicada en el cabezal. Con las adaptaciones antes mencionadas se permitió modelar la interacción del suelo con el pilote, entendido como un elemento volumétrico, y a la vez fue posible obtener de forma directa los diagramas de fuerza cortante y momento flector del pilote entendido como un elemento unidimensional estructural tipo viga.

Con el fin de estudiar la influencia que ejerce un pilote sometido a carga lateral sobre los pilotes vecinos, se planteó la evaluación de esfuerzos y desplazamientos en distintos puntos a lo largo de los pilotes. En los modelos se varió la posición relativa de un pilote vecino respecto a un pilote cargado.

En el desarrollo del trabajo, se evidenció la dificultad asociada a la necesidad del cambio de tamaño de los elementos que conforman la malla de elementos finitos al pasar del pilote al suelo. Para obtener calidad en los resultados de los esfuerzos y las deformaciones en el suelo que circunda cada pilote, fue necesario densificar la malla de elementos finitos en esas regiones de interés obligando así a utilizar un número muy grande de elementos en cada modelo. En consecuencia, el procesamiento requerido sobrepasó la capacidad de cálculo de los computadores disponibles aun siendo relativamente potentes. Debido a esto, no fue posible analizar grupos de pilotes completos. El trabajo tuvo que limitarse, entonces, al igual que en toda la literatura analizada, a los cálculos de la interacción entre dos pilotes adyacentes dependiendo de su separación y del ángulo entre la línea que une los pilotes y la dirección de la carga lateral aplicada, también se analizó el efecto de las condiciones de restricción en el cabezal de los pilotes.

Para el suelo se usó uno de tipo granular homogéneo y se adoptó el modelo elastoplástico de Mohr Coulomb. Con respecto a la influencia entre pilotes cercanos se observó que los modelos de elementos finitos simulan en buena aproximación los efectos de sombra y de borde, también se lograron verificar comportamientos identificados en desarrollos experimentales, con respecto al desempeño de la fila delantera y las filas traseras en un grupo de pilotes. Entre otros hallazgos, se encontró que la influencia en el momento flector máximo en un pilote vecino puede ser hasta del 10% del que se presenta en el pilote cargado en pilotes con cabezal libre y hasta del 80% en pilotes con cabezal restringido.

Se obtuvo que, en pilotes unidos por una viga cabezal la superposición de las zonas de interacción da como resultado una disminución en la capacidad de carga lateral del suelo circundante de cada pilote en el grupo. A pequeñas separaciones entre pilotes, los cálculos obtenidos a través del método de los elementos finitos pusieron en evidencia el efecto pronunciado de grupo. Esto es, se observó que el suelo que rodea el pilote cargado lateralmente presenta bajas reacciones puesto que al trabajar como grupo buena parte de la carga aplicada se distribuye en la fricción que se desarrolla en las caras verticales perimetrales al grupo y en la cara de la base, al igual que al frente del pilote vecino, además de que se presentan efectos de sombra o de borde.

Capítulo 1

INFLUENCIA ENTRE PILOTES SOMETIDOS A CARGA LATERAL

Los pilotes son una solución de cimentación que se implementa frecuentemente en grupos. Los modelos de análisis que se utilizan para grupos de pilotes deben considerar dos problemas:

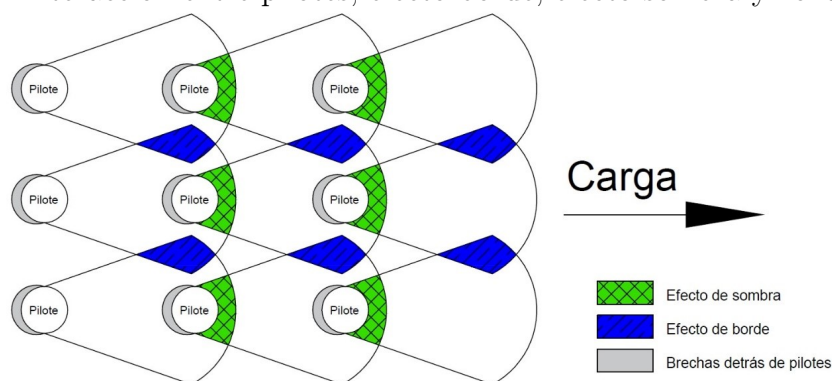
- la eficiencia de un pilote en el grupo
- la influencia de esfuerzos y deformaciones entre pilotes

1.1. Interacción entre pilotes bajo carga lateral

La influencia entre los pilotes cercanos de un grupo se ilustra en la Figura 1.1, en muchas ocasiones se supone que los pilotes del esquema están conectados en el cabezal a través de un dado de cimentación y que la deflexión lateral de todos los pilotes es la misma. Con la aplicación de la carga, cada pilote empuja el suelo delante de él y se genera una zona de incremento de esfuerzos que es particularmente intensa al frente del pilote, esta zona de influencia que se asemeja a una “sombra”, se agranda a medida que la carga lateral aumenta e incluso puede llegar a intersectarse con la “sombra” de otro pilote. La superposición de sombras que ocurre entre pilotes de la misma fila es conocida en la literatura como “Efecto de borde”, mientras que la superposición que se produce entre pilotes de diferentes filas se conoce como “Efecto de sombra”.

La superposición de las zonas de interacción da como resultado una disminución en la capacidad de carga lateral del suelo circundante de cada pilote ya que se generan zonas donde se desarrollan esfuerzos cortantes de gran magnitud. Además, ante la aplicación de la carga lateral, se pueden producir deformaciones tales que en el suelo situado detrás del pilote se genere una zona de relajación de esfuerzos y se produzca una grieta de tracción con la consecuente separación entre el suelo y la superficie del pilote.

Figura 1.1: Interacción entre pilotes, efecto borde, efecto sombra y zona de brecha



Fuente: Adaptado de Reese y Van Impe (2010)

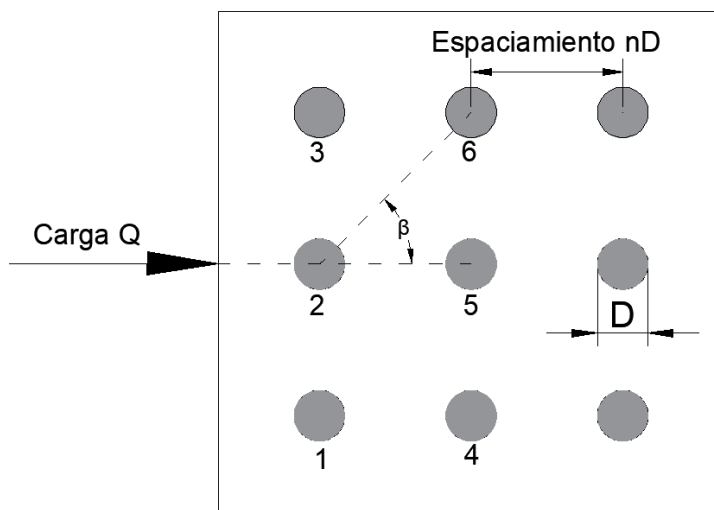
En la Figura 1.2 se muestra un grupo de pilotes cercanos dispuestos en filas. Debido a la presencia de los pilotes 2 y 8, ante la aplicación de la carga lateral, la resistencia del suelo adyacente al pilote 5 es menor que aquella para un mismo pilote aislado. Se puede decir que, el pilote 5 se localiza en la sombra del pilote 2, es evidente que el efecto sombra en la resistencia del suelo está relacionada con el espaciamiento entre pilotes.

De forma similar, la resistencia del suelo que rodea el pilote 5 en la Figura 1.2, está influenciada por la presencia de los pilotes 6 y 4. En este caso se desarrollará un efecto de borde que también está relacionado con el espaciamiento entre pilotes.

Algunos autores (Poulos y Davis, 1980; Focht y Koch, 1973) han usado la teoría de la elasticidad para desarrollar coeficientes de influencia que expresan los efectos de grupo relacionados con la geometría del grupo de pilotes.

En la Figura 1.2 un grupo de pilotes separados una distancia “ nD ”, donde n es un múltiplo del diámetro D , se somete a una carga lateral Q . El ángulo que se forma entre la línea de acción de la fuerza y la línea que une dos pilotes centro a centro se conoce como ángulo de partida β , este ángulo se dibuja en la Figura 1.2 entre los pilotes 2 y 6. Los factores de influencia expresan la interacción entre pilotes para diferentes separaciones “ nD ” y para diferentes ángulos β .

Figura 1.2: Geometría de grupo de pilotes



Fuente: Elaboración propia

1.2. Capacidad de un pilote sometido a carga lateral

En pilotes sometidos a carga lateral el elemento estructural está sometido a fuerzas cortantes y momentos flectores de magnitud no despreciable, en consecuencia, se hace importante la evaluación de estas sollicitaciones; en cambio en pilotes sometidos a carga axial la sección del pilote está sometida a fuerzas de compresión y los estados de esfuerzos producidos por las cargas son generalmente menores a la resistencia última del material del pilote.

Según Viggiani, Mandolini y Russo (2012), la capacidad de carga de pilotes sometidos a carga axial depende de las características del suelo en contacto con el fuste y la punta del pilote, en cambio bajo carga horizontal la interacción entre el suelo y el pilote se concentra en la región cercana a la superficie del suelo o al cabezal del pilote.

Al evaluar la capacidad de carga de un pilote ante carga lateral, es necesario establecer:

1. la distribución de presiones laterales últimas en el contacto suelo pilote y su variación con la profundidad
2. la resistencia estructural del pilote ante momento flector
3. el modo de falla del sistema suelo-pilote

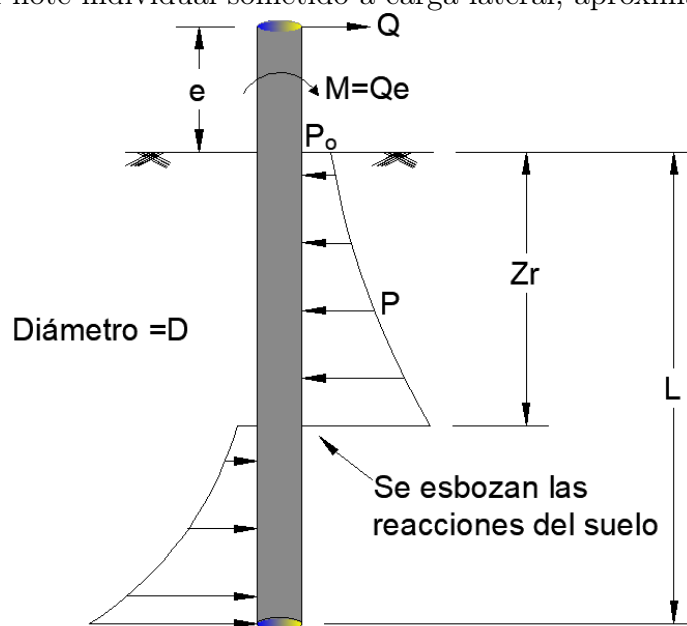
Si los pilotes se construyen muy cerca uno de otro, la capacidad de carga lateral que desarrollan en relación con aquella que desarrollarían si estuvieran aislados decrece, ya que un pilote en un grupo además de soportar la carga impuesta está influenciado por los pilotes que le rodean, en este sentido la carga última de falla Q_{ult} . se debe reducir para que tenga en cuenta esa interacción. La base teórica desarrollada para el estudio de pilotes ante carga lateral parte siempre del caso particular de pilote individual y se amplía al caso de grupos a través del uso de factores de interacción y del concepto de eficiencia.

1.2.1. Aproximación estática convencional

El análisis de un pilote ante carga lateral se ilustra en la Figura 1.3, donde se muestra que sobre un pilote actúan las acciones constituidas por la carga horizontal Q la cual al actuar con una excentricidad hace que actúe además el momento flector en el cabezal del pilote Qe . Como consecuencia de las acciones, se desarrollan unas reacciones en el suelo que rodea el pilote, estas reacciones deben garantizar el equilibrio de las cargas aplicadas, en la figura las reacciones se dibujan como una distribución de esfuerzos horizontales P a lo largo del fuste del pilote.

Según Poulos y Davis (1980), el análisis más simple para determinar la capacidad de carga lateral consiste en resolver el problema planteado en la Figura 1.3, suponiendo el pilote como si fuera una viga cargada e ignorando la resistencia que ofrece el suelo en la punta del pilote, de este modo es posible encontrar los valores límites de carga lateral H y momento flector M , necesarios para movilizar la resistencia última del suelo alrededor del pilote. En el problema además se suponen un punto de giro Z_r y una distribución de la resistencia del suelo a profundidad, la cual en la Figura 1.3 se simboliza como P .

Figura 1.3: Pilote individual sometido a carga lateral, aproximación estática



Fuente: Adaptado de Poulos y Davis (1980)

Para el caso de pilotes largos, la resistencia lateral última puede estar determinada por el momento de fluencia del pilote, el cual puede ser alcanzado antes de que se movilice totalmente la resistencia última del suelo. En estos casos, se debe calcular el momento máximo, el cual en pilotes con cabezal libre ocurre en el punto de cortante cero. Si se considera la resistencia estructural del pilote, la resistencia última lateral del pilote será la menor de:

- La carga horizontal requerida para causar la falla del suelo
- La carga horizontal requerida para producir el momento máximo igual al momento de fluencia de la sección de pilote

Este análisis se puede aplicar para encontrar la capacidad de carga de un pilote individual sobre el cual actúa una carga lateral.

1.2.2. Aproximación de Brinch Hansen

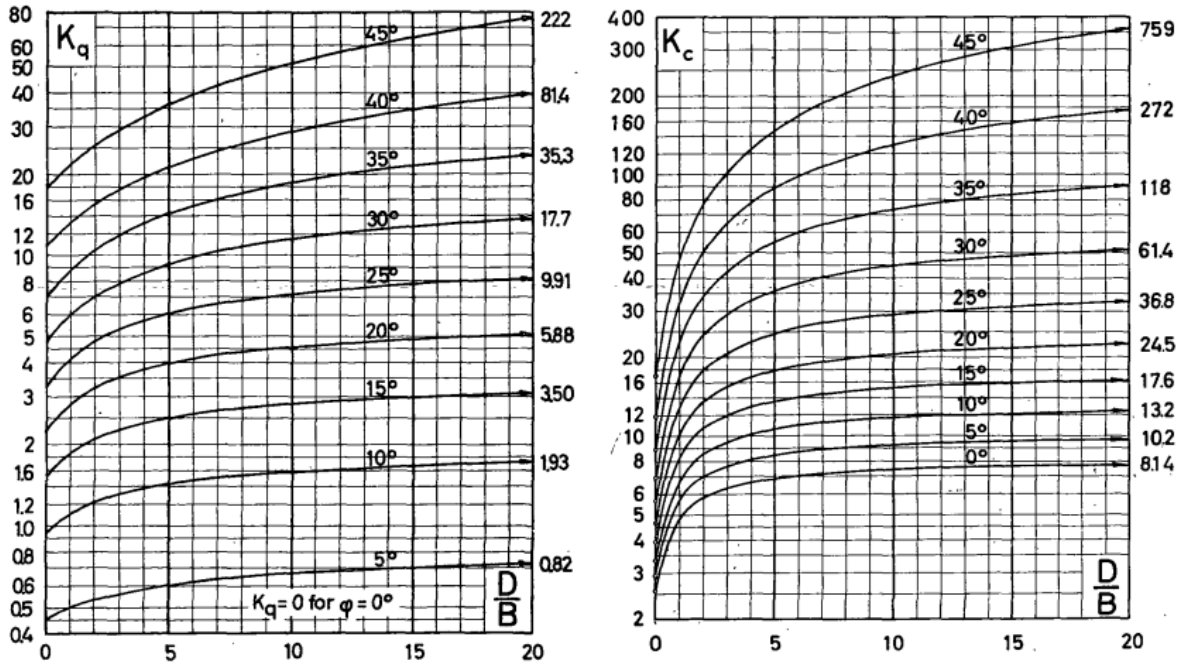
Brinch Hansen (1961), propuso una solución para encontrar la capacidad de carga lateral de pilotes en suelos tipo $c'-\phi'$. La solución se basa en la teoría de presión de tierras y consiste en calcular la distribución de esfuerzos alrededor del pilote suponiendo que, ante la aplicación de una carga horizontal, el pilote gira alrededor de un punto fijo localizado a una profundidad Z_r . Brinch Hansen (1961) supone que para profundidades inferiores al punto de rotación ($z < Z_r$), sobre la cara frontal del pilote actúan presiones pasivas y sobre la cara posterior se desarrollan presiones activas, consecuentemente, por debajo del punto de rotación la situación es inversa.

Brinch Hansen (1961) propone que la resistencia última por unidad de área frontal de pilote a una profundidad z se expresa como:

$$P_u = (P + \gamma z)K_q + cK_c \quad (1.1)$$

En la formulación anterior, P es el esfuerzo vertical en superficie, c es la cohesión del suelo y los factores K_q, K_c son función del ángulo de resistencia ϕ y de la relación adimensional z/D . En la Figura 1.4 se muestra la variación de los factores de resistencia lateral propuestos por Brinch Hansen (1961).

Figura 1.4: Factores de resistencia lateral K_q, K_c , Brinch Hansen (1961)



Fuente: Brinch Hansen (1961)

1.2.3. Teoría de Broms

La metodología de Bengt Broms presentada en dos artículos (Broms 1964-1 y Broms 1964-2), uno para suelos cohesivos y otro para suelos granulares, considera que, ante la aplicación de la carga lateral, como reacción en el suelo, se desarrolla una distribución lateral de presiones que corresponde al estado de falla.

Para el caso de suelos granulares, en condición tridimensional como la que rige en el caso de los pilotes, el coeficiente pasivo de presión de tierras suele tomarse como 3 veces el coeficiente en condición plana, esto es:

$$[K_p]_{3D} = 3[K_p]_{2D} \tag{1.2}$$

$$[K_P]_{3D} = 3 \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right)$$

La distribución de presiones propuesta para suelos de tipo granular, varía linealmente a profundidad y equivale entonces a tres veces la presión pasiva de Rankine:

$$P \left[\frac{kN}{m} \right] = 3\gamma z D K_p \tag{1.3}$$

Por otro lado, la distribución propuesta para suelos de tipo cohesivo alcanza un valor máximo que equivale a:

$$P \left[\frac{kN}{m} \right] = 9C_u D \quad (1.4)$$

Desde el punto de vista de falla en el suelo, si un pilote es corto se puede producir la falla en el suelo en toda la longitud del pilote, en contraste si el pilote es largo solo se producirá la falla en el suelo localizado cerca al cabezal del pilote. Respecto a los grados de libertad en el cabezal se distinguen dos categorías:

- Pilotes con cabezal libre: Aquellos donde el cabezal del pilote tiene la posibilidad de girar y desplazarse.
- Pilotes con cabezal restringido: Aquellos donde el cabezal del pilote tiene la posibilidad de desplazarse, pero no de girar, esta condición ocurre cuando el pilote está unido a una losa de cimentación, por ejemplo. En esta condición se puede desarrollar un momento flector de magnitud desconocida en el cabezal del pilote.

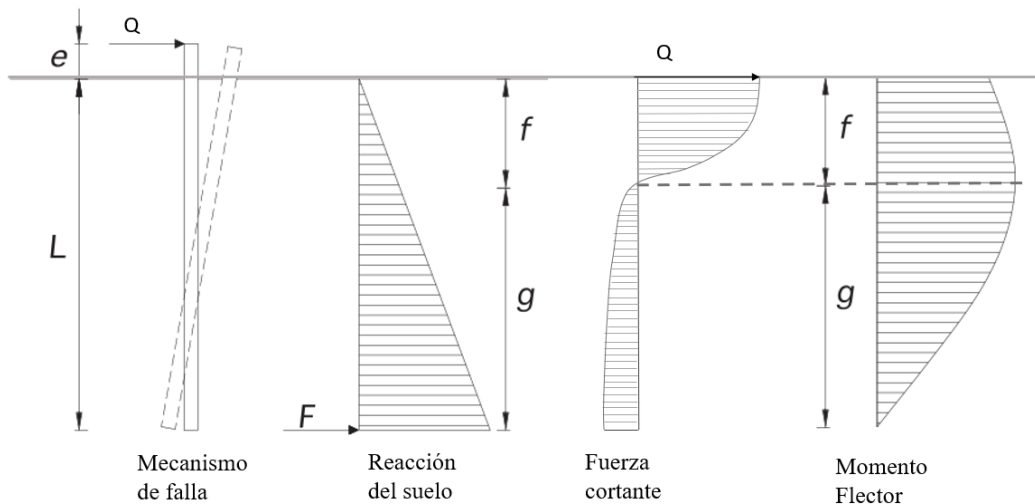
1.2.3.1. Pilotes Cortos, cabezal libre, suelo granular

Como se mencionó, ante la aplicación de la carga lateral última Q en el cabezal, para suelos granulares se supone que se desarrolla una distribución de reacciones que crece a profundidad y equivale a tres veces la presión pasiva de Rankine. A partir de la distribución de reacciones de la Ecuación 1.3, se encuentra la fuerza cortante en el pilote de la siguiente forma:

$$V[kN] = Q - \int_0^z 3\gamma DK_p z dz \quad (1.5)$$

$$V[kN] = Q - \frac{1}{2} 3\gamma DK_p z^2$$

Figura 1.5: Mecanismo de falla y reacción del suelo para pilotes con cabezal libre, suelo granular



Fuente: Adaptado de Viggiani et al. (2012)

En la Figura 1.5 se muestra el diagrama de reacciones supuesto, el diagrama de fuerza cortante y de momento flector en el pilote. A partir de la Ecuación 1.5 se obtiene el momento flector como sigue:

$$M[kNm] = Qe + \int_0^z Vdz \quad (1.6)$$

$$M[kNm] = Qe + Qz - \frac{1}{6}3\gamma DK_p z^3$$

Como el diagrama de momento debe cerrar en $z=L$, entonces reemplazando esto en la Ecuación 1.6 e igualando a cero, se obtiene la longitud mínima del pilote:

$$L[m] = \frac{Qe}{\frac{1}{2}\gamma DK_p L^2 - Q} \quad (1.7)$$

En la Figura 1.5 se indica que la profundidad a la que ocurre el momento flector máximo en el pilote es f , en esta profundidad la fuerza cortante es nula. Reemplazando $z=f$ e igualando a cero la Ecuación 1.5, se obtiene:

$$f[m] = \sqrt{\frac{2Q}{3\gamma DK_p}} \quad (1.8)$$

Se puede calcular el valor del momento máximo mediante el reemplazo de f en la Ecuación 1.6:

$$M_{max}[kNm] = Q \left[e + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2Q}{3\gamma DK_p}} \right] \quad (1.9)$$

La Ecuación 1.9 expresa el momento flector máximo, el cual se puede igualar al momento de fluencia de la sección del pilote para encontrar el diámetro mínimo. Conocido el diámetro se puede usar la Ecuación 1.7 para hallar la longitud mínima del pilote.

1.2.3.2. Pilotes Cortos, cabezal libre, suelo cohesivo

En la Figura 1.6 se muestra la distribución de reacciones supuesta para un pilote en suelo cohesivo al cual se aplica una carga lateral última Q . La distribución de reacciones en suelos cohesivos es la que se expresa mediante la Ecuación 1.4.

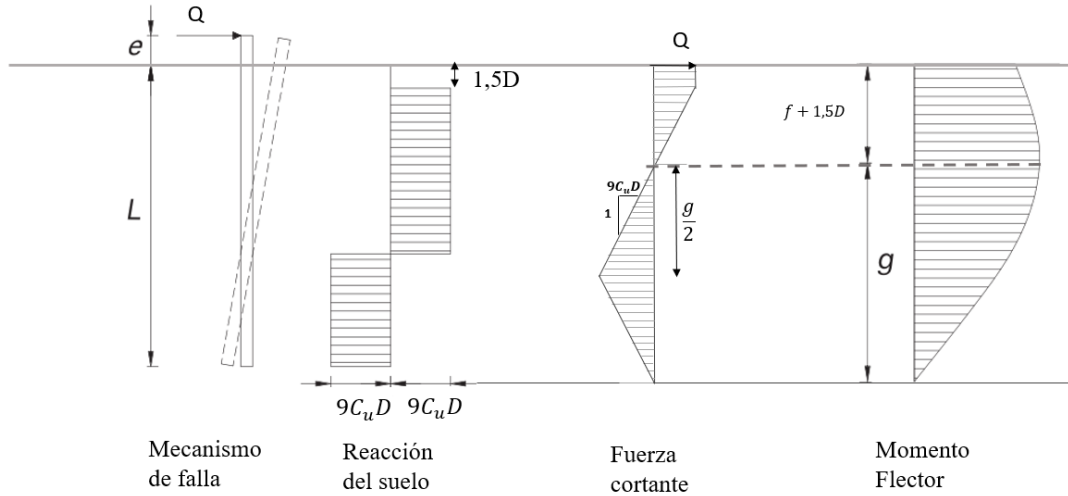
En la Figura 1.6 se observan el diagrama de fuerza cortante y el diagrama de momento flector producto de la distribución de presiones supuesta. Se supone que a una distancia de $1.5D$, el suelo cercano a la superficie no ofrece resistencia, también se supone que se desarrolla el momento flector máximo a una profundidad igual a $1.5D+f$, punto en el cual la fuerza cortante es cero.

Del diagrama de cortante mostrado en la Figura 1.6 se tiene que:

$$Q - 9C_u D f = 0$$

$$f = \frac{Q}{9C_u D} \quad (1.10)$$

Figura 1.6: Mecanismo de falla y reacción del suelo para pilotes con cabezal libre, suelo cohesivo



Fuente: Adaptado de Viggiani et al. (2012).

La condición de equilibrio de momentos implica que: la fuerza cortante resultante por encima del punto donde ocurre el momento flector máximo debe igualar la fuerza cortante por debajo del mismo punto. Del equilibrio de momentos resulta:

$$1,5DQ + \frac{Qf}{2} = \frac{9C_uDg^2}{4} \quad (1.11)$$

$$g = \left[\frac{4Q}{9C_uD} \left(1,5D + \frac{Q}{18C_uD} \right) \right]^{1/2}$$

Donde la longitud del pilote se puede expresar por medio de:

$$L = g + f + 1,5D \quad (1.12)$$

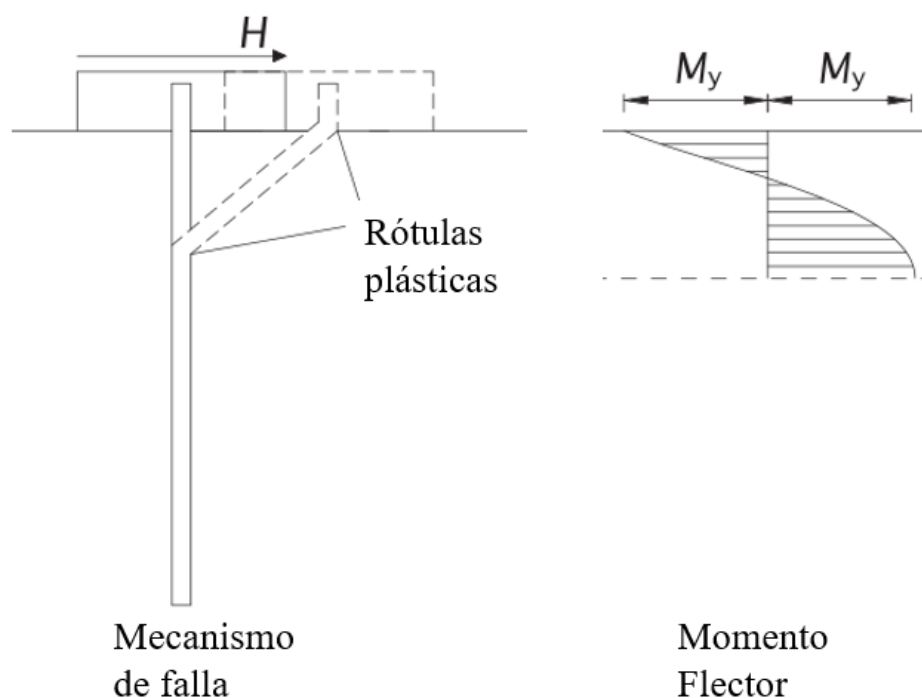
Igualando el momento flector máximo del pilote expresado en la Ecuación 1.11 con el momento máximo de la sección del pilote $M_y = f(D)$ se puede estimar el diámetro mínimo de pilote y con la Ecuación 1.12 se calcula la longitud mínima.

1.2.3.3. Pilotes largos con cabezal restringido

En pilotes con cabezal restringido se puede desarrollar un momento flector de magnitud desconocida en el cabezal del pilote y, debido a la restricción que ofrece la losa de cimentación, el cabezal no puede girar libremente. De otro lado, en pilotes largos el momento de fluencia de la sección del pilote puede verse superado en magnitud y puede darse la aparición de una rótula plástica en algún punto a lo largo del pilote, como se muestra en la Figura 1.7.

Para el caso del pilote largo y con cabezal restringido, si se supone que el momento de fluencia M_y se alcanza de forma simultánea en todos los puntos plásticos a lo largo del pilote, el diagrama de momentos puede suponerse como el que se muestra en la Figura 1.7. Bajo esa suposición las ecuaciones de predimensionamiento de pilotes quedan expresadas en términos del momento máximo de fluencia.

Figura 1.7: Mecanismo de falla en pilotes largos con cabezal restringido



Adaptado de Viggiani et al. (2012)

La metodología de Broms permite obtener las dimensiones preliminares mínimas del pilote, es decir la longitud L y el diámetro D de un pilote individual que se somete a una carga lateral última Q que, a su vez, produce una distribución de presiones que conducen a la falla en el suelo. Para evaluar la falla en el pilote como elemento estructural, se debe conocer el momento máximo de fluencia de la sección, el cual es función del diámetro y del material del pilote.

La teoría de Broms supone que la resistencia lateral última de pilotes relativamente cortos y cargados lateralmente está gobernada por la resistencia última del suelo circundante mientras que, la resistencia lateral última de pilotes relativamente largos está gobernada por las propiedades de resistencia a la fluencia de la sección del pilote.

Con respecto a la capacidad ante carga lateral de un grupo de pilotes, Broms afirma que puede ser considerablemente menor que la suma de las resistencias laterales últimas de cada pilote individual, debido a que, si el espaciamiento entre pilotes es pequeño, el suelo que se localiza entre pilotes se puede mover como una unidad con los pilotes cargados lateralmente desarrollando así un mecanismo de falla en bloque.

En Broms (1964) se dice que en un grupo de pilotes espaciados entre sí una distancia mayor a $4D$ (D =diámetro de los pilotes), a partir de escasos datos experimentales se ha encontrado que, no se evidencia disminución en la capacidad ante carga lateral, en contraste, para espaciamentos inferiores a $2D$, los pilotes y el suelo localizado entre ellos se comportan como una unidad en bloque y la capacidad ante carga lateral disminuye considerablemente.

1.2.4. Capacidad portante de grupos

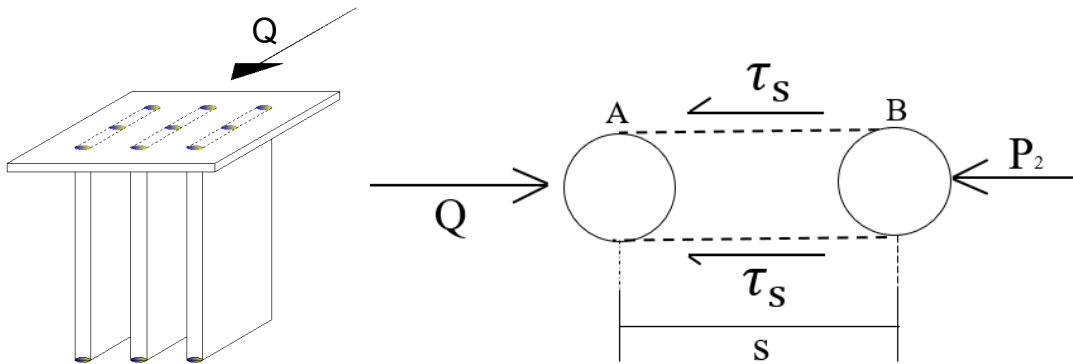
Un grupo de pilotes puede ser visto como un sistema de refuerzo del suelo, la falla del grupo puede ocurrir por la falla de los refuerzos individuales (pilotes) o por la falla general de todo el bloque de suelo involucrado. En general, como ya se mencionó, la falla en bloque de un grupo cargado lateralmente se asocia a espaciamientos pequeños entre los pilotes del grupo.

En la Figura 1.8 se muestra el esquema del bloque de falla para un grupo de pilotes cargados lateralmente. El mecanismo de falla mostrado en la figura ocurrirá cuando la resistencia al corte del suelo situado entre los pilotes sea superada por la resistencia límite de un pilote individual.

Como se muestra en la Figura 1.8, la fuerza límite por unidad de longitud detrás del pilote será la menor de:

- La resistencia última para pilote individual (calculada por los métodos convencionales)
- $2s\tau_s$, donde s es el espaciamiento de los pilotes en el grupo y τ_s es la fricción que se desarrolla en las caras del bloque de falla, es decir en las caras A-B que se indican en la Figura 1.8.

Figura 1.8: Bloque de falla crítico de grupo de pilotes cargados lateralmente



Fuente: Elaboración propia, adaptado de Fleming, Weltman, Randolph y Elson, (2009)

Para un sistema de dos pilotes, el equilibrio del diagrama de cuerpo libre mostrado en la Figura 1.8 implica que:

$$Q = 2s\tau_s + P_2 \quad (1.13)$$

1.2.4.1. Falla en bloque para grupo de pilotes en suelo granular

Para suelos no cohesivos la fuerza límite por unidad de longitud para un pilote individual se puede considerar como la propuesta por Broms $P_u = 3K_p\sigma_v D$ y el esfuerzo de corte límite, en la cara AB del bloque de falla, se puede considerar de la siguiente forma:

$$\tau_s = K\sigma_v \tan \phi \quad (1.14)$$

Donde ϕ es el ángulo de fricción del suelo y K es un coeficiente que se encuentra en el rango $K_0 < K < K_p$.

Suponiendo que la carga Q impuesta al grupo de pilotes iguala la fuerza límite por unidad de longitud para un pilote individual, es decir $Q=P_u$, y que $P_2 \cong 0$, se puede obtener el espaciamiento mínimo entre pilotes para el cual ocurre la falla en bloque mostrada en la Figura 1.8.

$$\begin{aligned} \tau_s &= K \frac{P_u}{3K_p D} \tan \phi \\ s/D &< \frac{3K_p}{2K \tan \phi} \end{aligned} \tag{1.15}$$

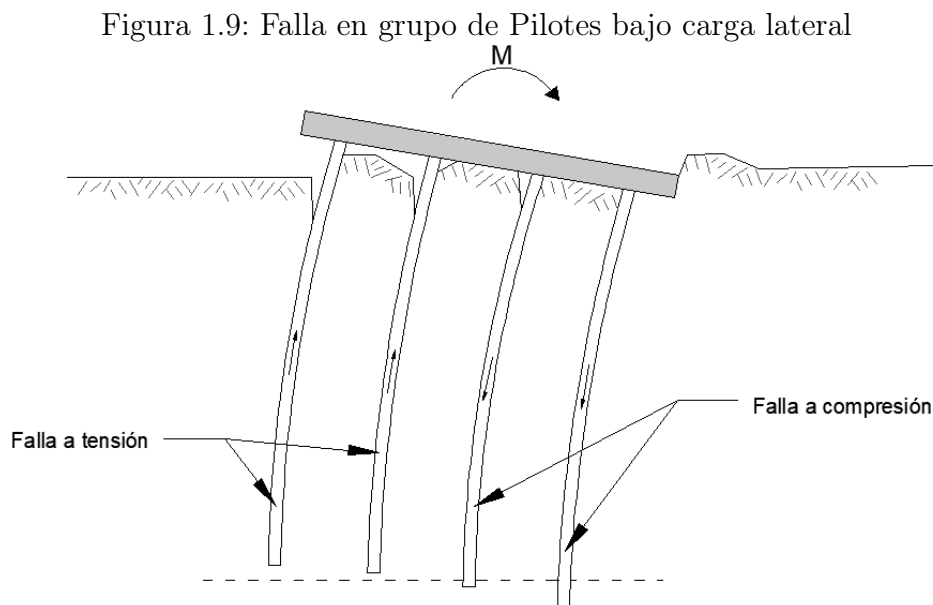
1.2.4.2. Falla en bloque para grupo de pilotes en suelo cohesivo

Para suelos cohesivos la fuerza límite por unidad de longitud para un pilote individual se puede considerar como la propuesta por Broms $P_u=9C_u D$.

Suponiendo que la carga Q impuesta al grupo de pilotes iguala la fuerza límite por unidad de longitud para un pilote individual, es decir $Q=P_u$, el reemplazo en la Ecuación 1.13 produce que la separación mínima para que ocurra la falla en bloque, en el grupo de pilotes cargados lateralmente estará dada por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} P_u &= 2s\tau_s = 2sC_u \\ 9C_u D &= 2sC_u \\ s &< 4,5D \end{aligned} \tag{1.16}$$

La falla en bloque bajo carga lateral involucra movimientos de traslación y movimientos de rotación, en la Figura 1.9 se muestra un esquema de grupo de pilotes que falla ante carga lateral. Los pilotes situados detrás del eje de rotación están sometidos a esfuerzos de tracción axial y eventualmente fallarán por arrancamiento, en contraste, los pilotes del frente fallarán a compresión. Bajo este escenario, la evaluación de la estabilidad total del sistema de cimentación deberá cuantificar la capacidad estructural axial de los pilotes además de su capacidad ante carga lateral.



Fuente: Elaboración propia, adaptado de Fleming et al. (2009)

1.2.5. Concepto de Eficiencia

Los métodos para evaluar la capacidad de carga lateral de pilotes se han desarrollado para pilote individual con diferentes condiciones de restricción en el cabezal. Sin embargo, en un grupo, debido a la proximidad de los pilotes que constituyen la cimentación, la capacidad portante del conjunto no se puede obtener directamente sumando las capacidades portantes de los pilotes considerados como elementos aislados, tampoco las deformaciones del grupo se pueden deducir directamente de aquellas que ocurrirían en un pilote solo. Los pilotes son una solución de cimentación que se implementa frecuentemente en grupos; por esta razón estos problemas de interacción deben ser considerados. Los efectos de grupo, de capacidad de carga y de deformación, se expresan a través de dos parámetros:

- La eficiencia de grupo
- La relación de asentamientos o de deformaciones

En un grupo de pilotes, la eficiencia se puede definir como la carga que soporta un pilote en el grupo en relación con la que soportaría como pilote individual. El factor de eficiencia usualmente se simboliza con la letra griega minúscula eta (η).

Poulos y Davis (1980), proponen que el concepto de la eficiencia de grupo para carga lateral η_L , se puede expresar de forma análoga como se formula la eficiencia ante carga vertical, por consiguiente, para un grupo conformado por n pilotes:

$$\eta_L = \frac{\text{Capacidad de carga lateral última del grupo}}{n \times \text{Capacidad de carga lateral última del pilote individual}}$$

De forma análoga, los autores plantean que, para estimar la capacidad de carga lateral de un grupo de pilotes (numerador en la expresión para η_L), se puede adoptar una aproximación similar a aquella adoptada para el cálculo de la capacidad de carga vertical. En este sentido, si n es el número de pilotes que conforman el grupo, la capacidad de carga de un grupo de pilotes es la menor de:

1. n veces la capacidad de carga lateral de un pilote solo: Obtenida a partir de los métodos de cálculo para pilote individual (Aproximación estática convencional, teoría Broms (1964-1 y 1964-2), aproximación de Brinch Hansen (1961), etc.
2. La capacidad de carga de un bloque individual equivalente que contiene los pilotes en el grupo y el suelo entre ellos, este caso representa la falla en bloque y, como ya se expuso, ocurre a grupos con pilotes muy cercanos. En este caso el análisis se puede simplificar suponiendo un gran pilote individual, cuyo diámetro es igual al ancho del grupo, por consiguiente, se deberá considerar la resistencia generada por la fricción lateral en la base del grupo.

Una serie de pruebas en modelos de grupos de pilotes en una arcilla fue llevada a cabo por Prakash y Saran (1967), los resultados experimentales mostraron que:

- La eficiencia η_L decrece con el aumento en la cantidad de pilotes en el grupo
- La eficiencia η_L decrece con la disminución del espaciamiento entre pilotes.

- Mediante la comparación de la eficiencia η_L con aquella para grupos de pilotes cargados axialmente η , se ha encontrado que $\eta_L < \eta$, es decir, los grupos de pilotes son menos eficientes bajo carga lateral que bajo carga axial.

La estimación de la eficiencia es importante porque si los pilotes en el grupo están espaciados uno cerca del otro, los pilotes se influyen mutuamente debido a la interacción pilote-suelo-pilote, como consecuencia se desarrollan una serie de efectos que alteran la resistencia del suelo involucrado en esa interacción. En este sentido, la eficiencia tiene relación con las fuerzas transmitidas hacia la vecindad por el suelo que está en contacto con el pilote. Según Reese y Van Impe (2010), los métodos para estimar la eficiencia, tanto para carga axial como para carga lateral, están basados en resultados experimentales.

Es claro que, para grupos de pilotes sometidos a carga lateral, la capacidad de carga horizontal del grupo es generalmente menor que la suma de las capacidades de carga lateral de los pilotes individuales; en este sentido la eficiencia de un grupo de pilotes con carga horizontal es más pequeña que la unidad.

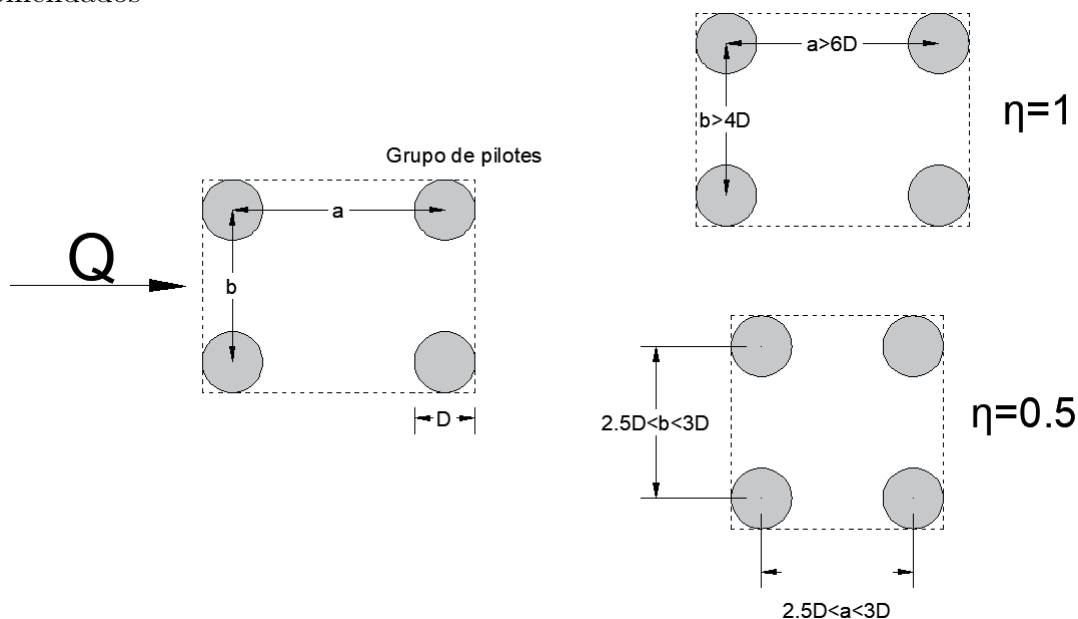
La evidencia experimental, para grupos de pilotes con carga lateral, se reduce a grupos pequeños de pilotes o a pruebas de laboratorio en modelos a escala a la gravedad natural o ejecutados en la máquina centrífuga. Sobre la base experimental parece que, el espaciamiento entre los pilotes y la dirección de aplicación de la carga respecto a la configuración geométrica del grupo, son determinantes en la estimación de la eficiencia de grupo η_L . En el libro de Viggiani et al. (2012), se mencionan los siguientes hallazgos sobre la evidencia experimental en este tema:

Considerando la Figura 1.10 en la cual se muestra el esquema en planta de un grupo de pilotes bajo carga lateral, donde “a” representa la separación de pilotes en la dirección de aplicación de la carga y “b” representa la separación en la dirección ortogonal, experimentos han mostrado que:

- Si se cumple que: $a > 6D$ y $b > 4D$, la eficiencia tiende a ser igual a la unidad, lo que significa que, sin importar el tipo de suelo de cimentación, la capacidad de carga del grupo será igual a la suma de las capacidades de carga individuales de los pilotes que conforman el grupo.
- Para valores comunes de espaciamientos entre pilotes ($2.5D$ a $3D$), la eficiencia η_L se puede considerar del orden de 0.5 y para valores intermedios, se sugiere una interpolación lineal.

En un grupo rectangular como el del ejemplo de la Figura 1.10, en el cual la dimensión “a” es mayor que la dimensión “b”, los experimentos han mostrado que, el grupo de pilotes es más eficiente si la carga se aplica en la dirección perpendicular a la mayor dimensión del grupo o, dicho de otra forma, paralela al lado corto del grupo, de acuerdo con el esquema de la figura, para mayor eficiencia, la carga lateral debería estar aplicada en el lado “a” y perpendicular a esa cara.

Figura 1.10: Esquema en planta de grupo de Pilotes bajo carga lateral, valores de eficiencia recomendados



Fuente: Elaboración propia.

Es claro que la respuesta de un grupo de pilotes cargados lateralmente es diferente al de un pilote considerado de forma individual dentro del grupo, entre otros factores, las diferencias se deben principalmente a la interacción entre pilotes a través del entorno suelo. La posición de cada pilote dentro del grupo en relación con la dirección de la aplicación de la carga, así como el espaciamiento entre los pilotes, son factores que inciden sobre la capacidad de carga del grupo y también sobre la forma en la que se deforma el sistema de pilotes y cada pilote individual.

1.3. Análisis de desplazamientos de pilotes cargados lateralmente

El análisis del comportamiento de grupos de pilotes sometidos a carga lateral también incluye la forma como se desplazan los pilotes en el grupo. La proximidad entre pilotes de un grupo da lugar a que se generen interacciones pilote-suelo-pilote, estas interacciones tienen un efecto no solo en la capacidad ante carga lateral sino también sobre los desplazamientos producidos por la aplicación de la carga. De la misma forma, la posición relativa de un pilote en el grupo tiene influencia sobre la forma en la que el pilote se desplaza, en términos de deformación elástica esto se traduce en la magnitud de la fuerza cortante y del momento flector que se desarrollan a lo largo del pilote entendido como una viga.

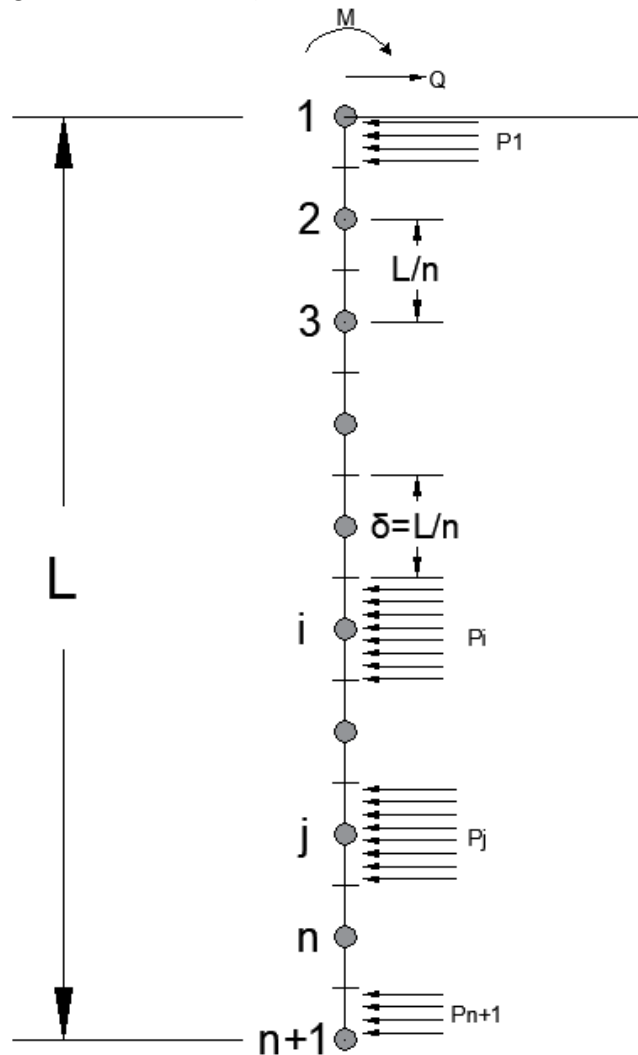
Algunos métodos de análisis para estudiar desplazamientos de grupos de pilotes ante carga lateral se han desarrollado considerando la interacción entre pilotes a través de unos factores de influencia. Los factores de influencia expresan matemáticamente los desplazamientos en un elemento de suelo debidos a una carga que actúa en un elemento de suelo vecino, en este sentido el suelo y el pilote se discretizan para poder estudiar la influencia entre elementos.

Otra metodología para análisis de desplazamientos de pilotes ante carga lateral consiste en establecer una relación no lineal entre la fuerza de reacción del suelo y el desplazamiento en el pilote producido por la carga aplicada, como resultado se obtiene una curva de carga-desplazamiento conocida como curva $p-y$. La extensión de este análisis a grupos de pilotes consiste en simular la interacción entre pilotes a través de la modificación de las curvas $p-y$ obtenidas para un pilote individual.

1.3.1. Análisis elástico -Método de los factores de interacción

La metodología de análisis de desplazamientos laterales en pilotes presentada en Poulos y Davis (1980), desarrolla una solución para pilotes flotantes. El pilote se modela como un elemento rectangular de ancho d , longitud L , y rigidez a flexión $E_p I_p$ constante. Como se muestra en la Figura 1.11 el pilote y el suelo se discretizan en elementos de longitud $\delta=L/n$, los elementos de suelo se caracterizan por sus propiedades elásticas: módulo elástico E_s y relación de Poisson ν .

Figura 1.11: Pilote cargado lateralmente, discretización método de factores de interacción



Fuente: Elaboración propia, adaptado de Poulos & Davis (1980)

En la Figura 1.11, ante la aplicación de la carga lateral Q y el momento M , la reacción del suelo p sobre un elemento j , puede generar un desplazamiento en un elemento vecino i , donde ρ_{ij} es el desplazamiento en el elemento de suelo i causado por la carga p que actúa en el elemento j . Los desplazamientos ρ_{ij} se evalúan por integración de la ecuación de Mindlin sobre un área rectangular, para un desplazamiento horizontal de un punto en una masa semi-infinita causado por una carga horizontal puntual aplicada sobre el espacio semi-infinito.

En forma matricial, los desplazamientos del suelo a lo largo de todos los puntos en contacto con el pilote se pueden escribir como:

$$\rho_s = \frac{D}{E_s} [I_s] \{p\} \quad (1.17)$$

Donde:

ρ_s es el vector columna de los desplazamientos horizontales del suelo

$\{p\}$ es el vector columna de las reacciones horizontales en el suelo

$[I_s]$ es la matriz de factores de influencia de desplazamientos del suelo, la cual está conformada por elementos I_{ij} que cuantifican el desplazamiento de los elementos de suelo i causado por la carga p que actúa en el elemento j

D es el diámetro de pilote

E_s es el modulo elástico del suelo

Para determinar los desplazamientos del pilote ρ_p , se usa la ecuación diferencial para una viga. La ecuación se puede escribir en términos de diferencias finitas para diferenciales dL de la longitud del pilote, desde el elemento 2 hasta el elemento n , de la siguiente forma:

$$-\{p\} = \frac{E_p I_p n^4}{dL^4} [D] \{\rho_p\} + \frac{E_p I_p}{dL^4} \{A\} \quad (1.18)$$

Donde:

ρ_p es el vector columna de los desplazamientos del pilote

$\{p\}$ es el vector columna de las reacciones horizontales en el suelo

n es el número de elementos en el que se divide el pilote

$[D]$ Es una matriz de coeficientes de diferencias finitas

$\{A\}$ es el vector de desplazamientos y giros en el cabezal

I_p es la inercia de la sección transversal del pilote

E_p es el modulo elástico del material del pilote

La compatibilidad implica que $\rho_p = \rho_s$ y los desplazamientos del suelo de la Ecuación 1.17 se igualan con los desplazamientos del pilote de la Ecuación 1.18, de esta forma se obtiene una ecuación que depende solo de las cargas p que expresan las reacciones horizontales en el suelo.

Las otras ecuaciones requeridas para el análisis son las ecuaciones de equilibrio de fuerzas horizontales y de momentos flectores, es necesario comentar que el equilibrio debe garantizar que los diagramas de cortante y de momento flector en la viga cierren. Finalmente, se resuelven las cargas p que expresan las reacciones horizontales en el suelo a partir del sistema de ecuaciones compuesto por:

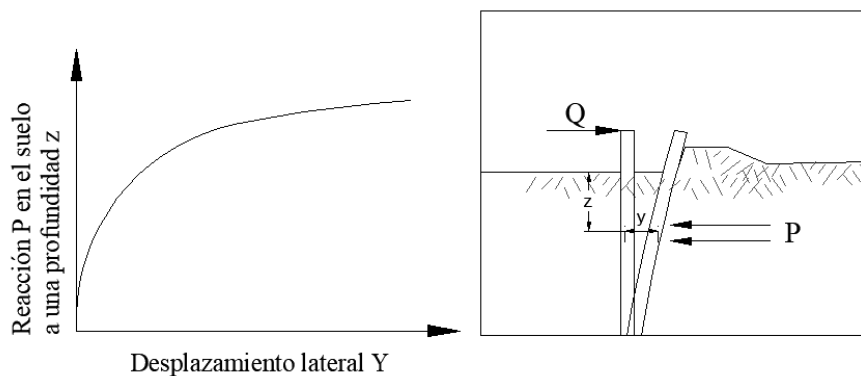
- Compatibilidad de deformaciones
- Equilibrio de fuerzas horizontales
- Equilibrio de momentos

Luego se calculan los desplazamientos en el suelo con la Ecuación 1.17 y conocidos los desplazamientos, se pueden evaluar las fuerzas cortantes y momentos flectores a lo largo del pilote.

1.3.2. Relaciones carga desplazamiento o Curvas p-y

En el método de las curvas $p-y$ el suelo se representa a través de una relación no lineal entre la reacción p del suelo y la deflexión lateral y a una profundidad z determinada, como se ilustra en la Figura 1.12.

Figura 1.12: Curva p-y



Fuente: Elaboración propia

Las curvas $p-y$ se deben determinar con pruebas de campo para conocer la rigidez del suelo en diferentes puntos a lo largo del fuste del pilote. Se han propuesto formulaciones de curvas $p-y$, basadas en datos experimentales de pilotes instrumentados, en el libro de Reese y Van Impe (2010), se propone por ejemplo la siguiente relación para el caso de suelo arcilloso:

$$\text{Curva } p-y \text{ para arcilla blanda: } \frac{P}{P_{ult}} = 0,5 \left(\frac{y}{2,5\varepsilon_{50}D} \right)^{1/3} \quad (1.19)$$

Donde:

ε_{50} corresponde a la deformación al 50 % del esfuerzo desviador de falla en un ensayo de compresión triaxial.

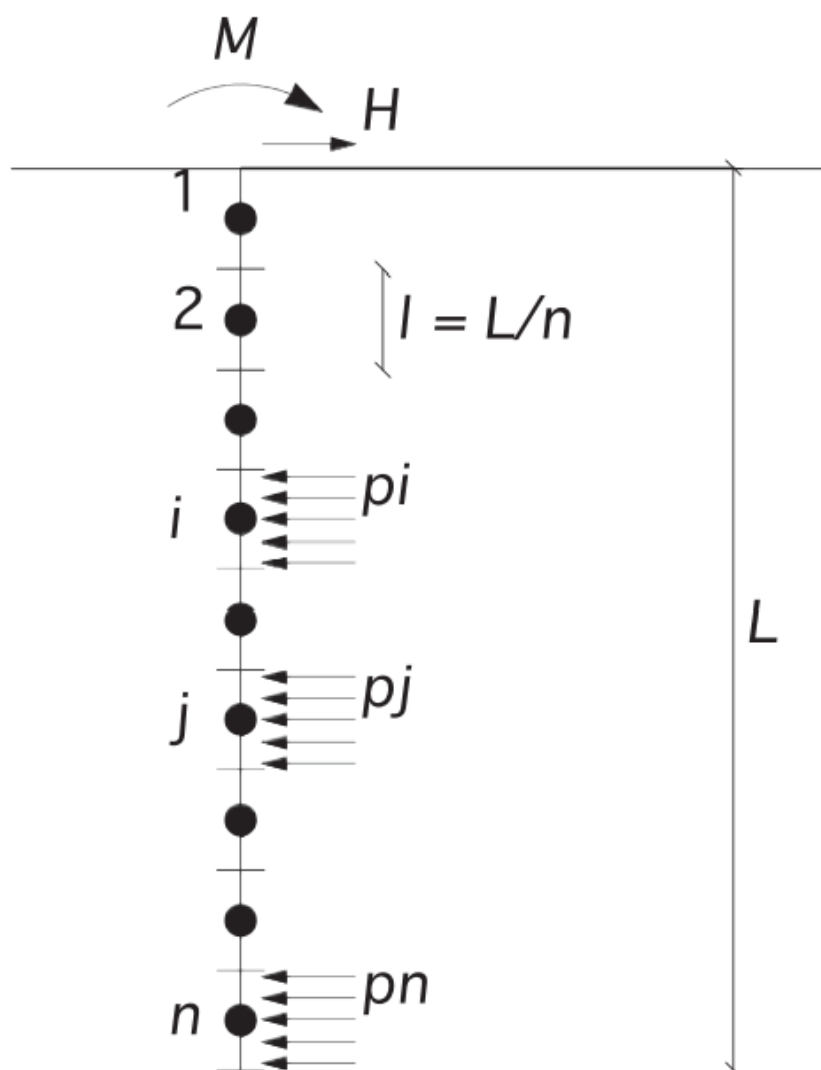
P_{ult} es el valor de la resistencia última del suelo por unidad de longitud de pilote de diámetro D . Para suelos friccionales o cohesivos Broms propone: $P_{ult}=3K_pD$ o $P_{ult}=9C_uD$ en cada caso (Broms 1964-1 y Broms 1964-2).

Así como la formulación anterior, existen propuestas de curvas $p-y$ para arenas bajo y sobre el nivel freático; suelos con cohesión y ángulo de fricción (*suelos $c-\phi$*), y rocas blandas.

1.3.3. Método de los elementos de contorno (Boundary Element Method) BEM

En el método de los elementos de contorno, la interfaz suelo-pilote se discretiza en n elementos de área rectangular de ancho d y longitud $l=L/n$. Como se muestra en la Figura 1.13, la distribución de esfuerzos actuando en las interfaces se aproxima con n valores de esfuerzo normal p uniformemente distribuido con intensidad constante sobre cada elemento. En la figura el pilote está representado por los elementos i hasta j , y el suelo se modela como un semi espacio elástico que rodea el pilote.

Figura 1.13: Esquema de un pilote individual bajo carga lateral y momento, discretización BEM



Fuente: Adaptado de Viggiani et al. (2012).

Para el sistema mostrado en la Figura 1.13 se plantean las ecuaciones de compatibilidad de desplazamientos entre el suelo y la estructura, igualando el desplazamiento horizontal del pilote con el del elemento suelo, ambos calculados a la mitad de la altura de cada elemento. Se plantean las ecuaciones de equilibrio entre las fuerzas externas, M y H indicadas en la Figura 1.13 y la distribución de fuerzas a lo largo del fuste del pilote.

De la Figura 1.13, los desplazamientos de los puntos que pertenecen al pilote se calculan como una función lineal de los esfuerzos p_j y los desplazamientos y giros y_0, θ_0 desconocidos, de esta forma, el desplazamiento horizontal a la mitad de la altura de un elemento i de pilote se puede escribir como sigue:

$$y_i = - \sum_{j=1}^n a_{ij} P_j + y_0 + \theta_0 z_i \tag{1.20}$$

En la ecuación anterior:

$P_j = p_j dl$ Es la fuerza que actúa en el elemento j del pilote
 y_0, θ_0 presentan el desplazamiento y el giro, desconocidos en la cabeza del pilote

El factor a_{ij} se calcula con:

$$a_{ij} = \frac{z_i^3}{3E_p I_p} + \frac{z_i^2(z_j - z_i)}{2E_p I_p}, \text{ si } z_i \leq z_j$$

$$a_{ij} = \frac{z_i^3}{3E_p I_p} + \frac{z_j^2(z_i - z_j)}{2E_p I_p}, \text{ si } z_i > z_j \tag{1.21}$$

El desplazamiento horizontal w_{ij} inducido en un punto i que pertenece al semi espacio, por una fuerza horizontal P_j aplicada en el punto j se puede obtener mediante la solución de Mindlin (1936):

$$w_i = - \sum_{j=1}^n w_{ij} = \sum_{j=1}^n b_{ij} P_j$$

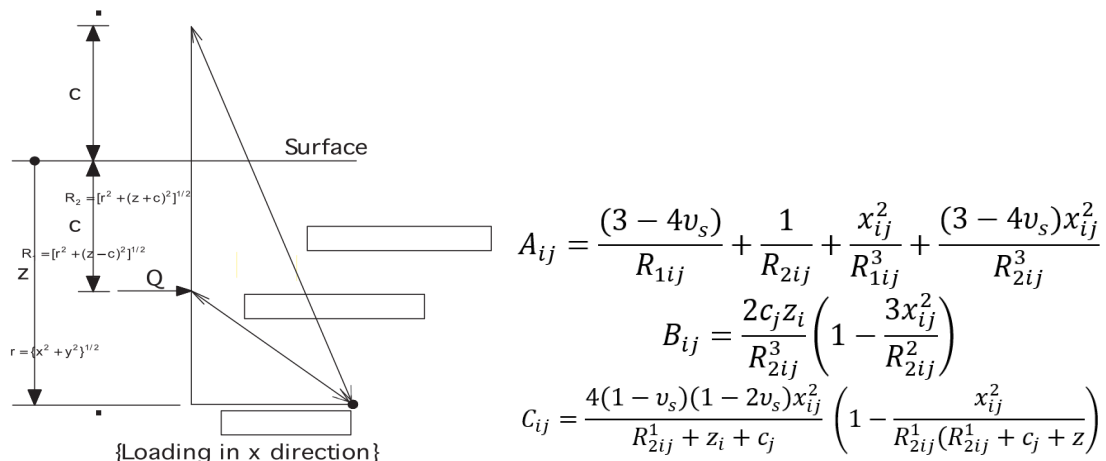
(1.22)

Donde el factor b_{ij} :

$$b_{ij} = \frac{A_{ij} + B_{ij} + C_{ij}}{16\pi G(1 - \nu)}$$

Los factores A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} se escriben en función del módulo de Young E , la relación de Poisson del suelo ν , y las distancias entre el punto en el semi espacio elástico, el punto de aplicación de la carga y la superficie, como se muestra en la Figura 1.14.

Figura 1.14: Problema de Mindlin para carga lateral en un semi espacio elástico



Como se expresa en la Ecuación 1.20, los desplazamientos del suelo se escriben como una función lineal de las fuerzas desconocidas P_j .

El problema se resuelve igualando el desplazamiento horizontal del pilote con el del semi espacio elástico en cada punto, ambos calculados a la mitad de la altura de cada elemento, la compatibilidad de desplazamientos se expresa de la siguiente forma:

$$y_i = w_i \text{ para } i = 1 \text{ hasta } n \quad (1.23)$$

El equilibrio global de fuerzas y momentos resulta:

$$\begin{aligned} H &= \sum_{j=1}^n P_j \\ M &= - \sum_{j=1}^n P_j * z_j \end{aligned} \quad (1.24)$$

El sistema de $(n+2)$ ecuaciones lineales conformado por Ecuación 1.23 y Ecuación 1.24, se resuelve para los $(n+2)$ valores desconocidos de p_j y los desplazamientos y giros y_0, θ_0 . Si la cabeza del pilote no es libre de rotar $\theta_0=0$, y se omite la segunda ecuación del equilibrio.

1.3.4. Desplazamiento lateral en grupos de pilotes

El método de los factores de interacción extendido para un grupo de pilotes considera dos pilotes idénticos sobre los cuales actúa la misma carga. El espaciamiento centro a centro entre pilotes se denota como s y el ángulo entre la línea que une los centros de los pilotes y la dirección de aplicación de la carga es β y se conoce en la literatura como ángulo de salida o ángulo de partida como se muestra en la Figura 1.15.

Como producto del análisis de interacción, se estudia el movimiento horizontal de un pilote el cual es consecuencia de la carga aplicada sobre un pilote vecino, ambos en la misma dirección.

En la Figura 1.15 las deflexiones en el suelo a lo largo del pilote 1 se pueden expresar como:

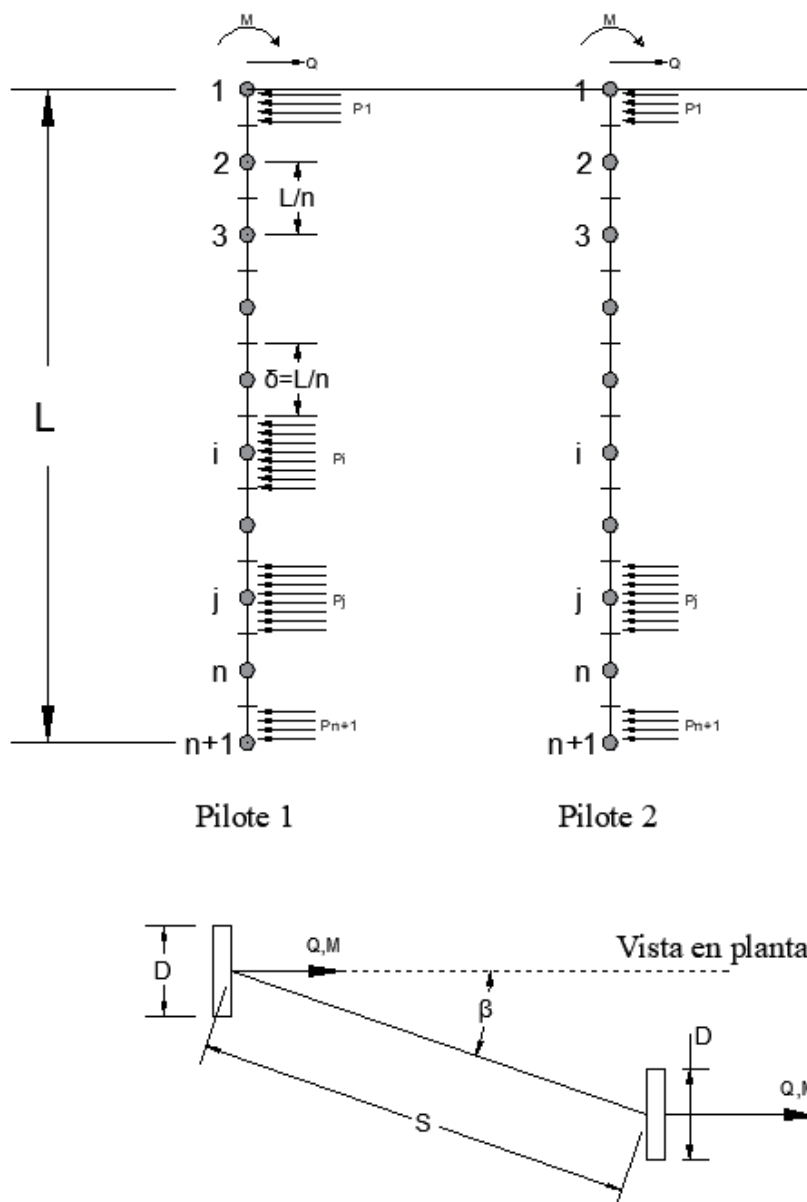
$$\{\rho_s\} = \frac{D}{E_s} [I_1 + I_2] \{p\} \quad (1.25)$$

Donde $[I_1 + I_2]$ son matrices de tamaño $(n+1) \times (n+1)$ constituidas por factores de influencia I_{ij1} e I_{ij2} , los factores de influencia para el desplazamiento horizontal en i causados por los esfuerzos en el elemento j ; del pilote 1 y del pilote 2 respectivamente.

Los factores de influencia para el pilote 1 (I_{ij1}), se obtienen como si fuera pilote individual.

Los valores de los factores de influencia para el pitote 2 (I_{ij2}) se obtienen considerando presiones uniformes sobre cada elemento del pilote 2 reemplazadas por una carga equivalente actuando en el centro de cada elemento.

Figura 1.15: Método de los factores de interacción extendido para un grupo de 2 pilotes



En el método aplicado al grupo de dos pilotes, se usa la Ecuación 1.23 y también se resuelven las ecuaciones de equilibrio, luego se usa la compatibilidad de desplazamientos entre los elementos del pilote y el suelo para obtener soluciones para la influencia del segundo pilote sobre los desplazamientos y las rotaciones del primer pilote, para varios espaciamientos s y para diferentes β .

En este método propuesto y desarrollado por Poulos y Davis (1980), se usan unos factores de interacción que expresan los desplazamientos o rotaciones adicionales causados en un pilote por la presencia de otro pilote adyacente, estos factores se calculan para cada uno de los n elementos en los que se discretizan los pilotes. Por ejemplo, es posible definir los siguientes factores de interacción:

$$\alpha_p = \frac{\text{Desplazamiento adicional causado por el pilote adyacente}}{\text{Desplazamiento del pilote causado por la carga actuante sobre él mismo}}$$

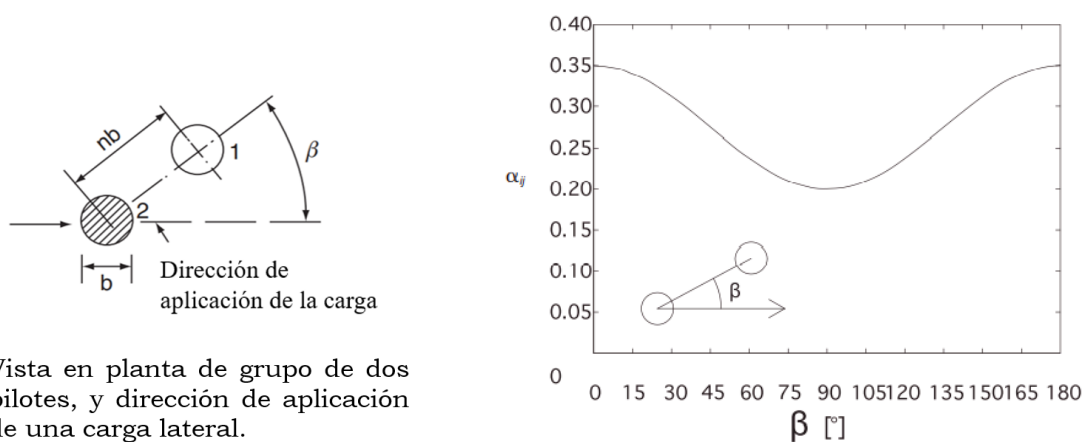
$$\alpha_\theta = \frac{\text{Rotación adicional causado por el pilote adyacente}}{\text{Rotación del pilote causado por la carga actuante sobre él mismo}}$$

Análogos de los factores de interacción definidos anteriormente, se definen diferentes tipos de factores de interacción según las condiciones de frontera en la cabeza de los pilotes en el grupo.

Los factores α_{ij} permiten estimar la influencia del pilote cargado i sobre el pilote no cargado adyacente j , según Poulos y Davis (1980) los factores conforman una matriz de interacción simétrica e independiente del nivel de carga.

Para el caso de pilotes bajo carga vertical α_{ij} es función de la separación de los pilotes. Para el caso de pilotes bajo carga horizontal α_{ij} es función de la separación de los pilotes y además del ángulo β mostrado en la Figura 1.2, el cual, como ya se mencionó, es el ángulo entre el vector de carga y la línea que conecta los pilotes i - j .

Figura 1.16: Variación del factor de interacción entre un par de pilotes i,j ; como función del ángulo de salida β



Vista en planta de grupo de dos pilotes, y dirección de aplicación de una carga lateral.

Fuente: Adaptado de Poulos y Davis (1980)

En la Figura 1.16 se muestra la variación del factor de interacción α_{ij} entre un par de pilotes i,j ; como función del ángulo de salida β . En la figura se observa que cuando el ángulo β es 0° ó 180° el factor de interacción α_{ij} es máximo, y cuando el ángulo β es 90° el factor de interacción toma el valor mínimo, que indica que el pilote cargado tendrá menos influencia sobre uno adyacente.

Según Viggiani et al. (2012), la evidencia experimental sugiere que la matriz de interacción no es simétrica, y que para bajos niveles de carga, el valor de α_{ij} a $\beta=180^\circ$ puede ser la mitad del de α_{ij} a $\beta=0^\circ$, experimentos han mostrado que los factores de interacción no son independientes del nivel de carga, ya que tienden a incrementar con el valor de la carga, es decir a mayores niveles de carga la presencia de un pilote influirá más sobre el comportamiento de sus pilotes vecinos.

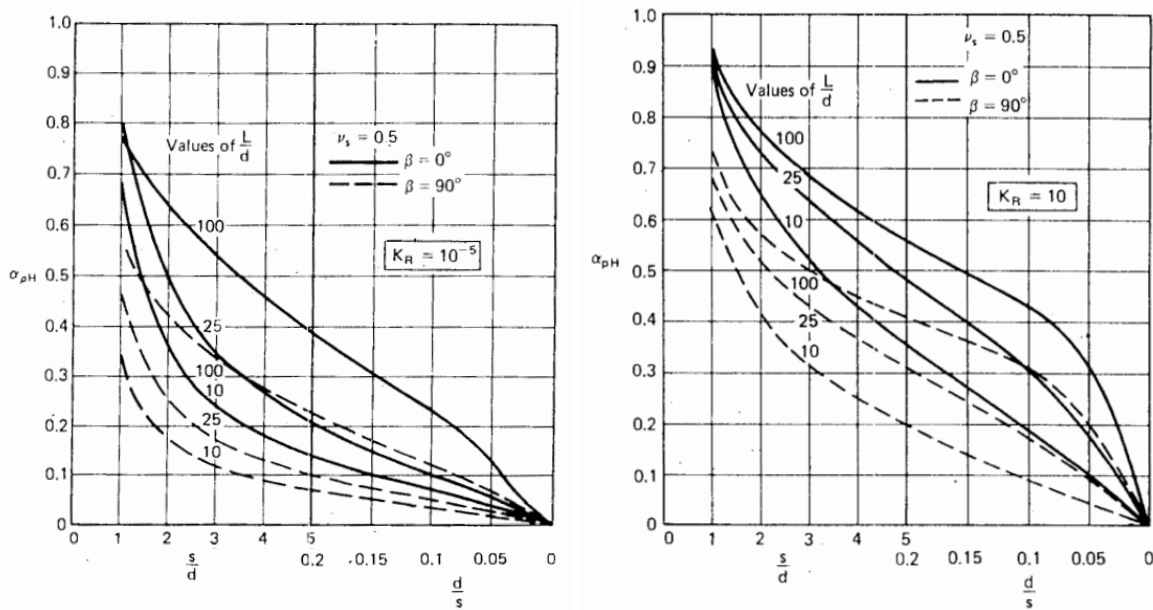
En Poulos y Davis (1980), se presentan gráficas de factores de interacción para diferentes β , y para diferentes relaciones s/D (s = separación entre ejes de pilotes, D =diámetro de pilote), las gráficas mostradas en la Figura 1.17 muestran valores de factores de interacción para diferentes configuraciones de grupos de dos pilotes. En las gráficas el parámetro K_R expresa la rigidez relativa del pilote respecto al suelo circundante de la siguiente forma:

$$K_R = \frac{E_p I_p}{E_s L^4} \tag{1.26}$$

De las gráficas mostradas en la Figura 1.17, se puede decir que:

- Todos los valores de los factores de interacción son inversamente proporcionales a las relaciones s/D y L/D
- El valor de los factores de interacción α_{ij} aumenta con la rigidez relativa del pilote, la cual se expresa a través del parámetro K_R
- Se consideran valores de K_R en el rango 10^{-5} (pilote flexible) y 10 (pilote rígido)

Figura 1.17: Gráficas de Factores de interacción α_p para pilote con cabeza fija. Pilote flexible (Izquierda) y Pilote Rígido (Derecha)



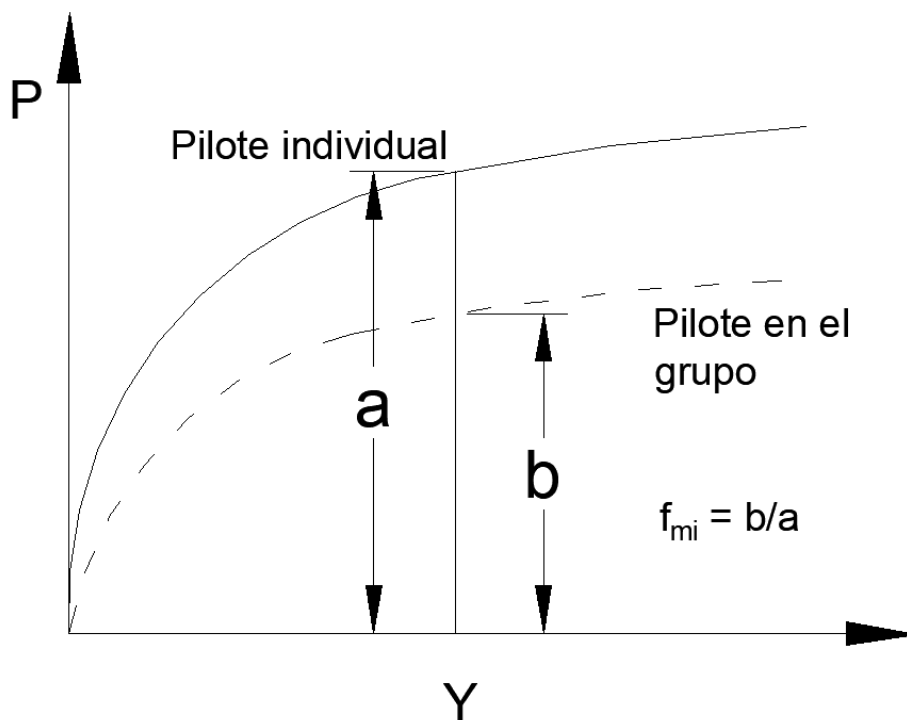
Fuente: Poulos y Davis (1980)

Con respecto a la metodología de curvas $p-y$ en el análisis de grupos de pilotes las propuestas existentes plantean la modificación de la forma de las curvas, con el objetivo de simular artificialmente el efecto de interacción entre pilotes a través del suelo.

La adaptación de las curvas se basa en “multiplicadores $p-y$ ”, concepto introducido por Brown, Morrison y Reese (1988); en la Figura 1.18 el multiplicador “ f_m ” afecta los valores de p obtenidos para pilote individual a fin de incluir la interacción entre las filas en un grupo de pilotes. Los valores de “ f_m ” se encuentran en el rango [0-1], la mayoría de los experimentos en grupos de pilotes se han desarrollado para encontrar valores de los multiplicadores $p-y$.

Al observar la Figura 1.18 es claro que, si el multiplicador f_{mi} es igual a la unidad, entonces las curvas $p-y$ para pilote en grupo y pilote individual coinciden, esto puede suceder en grupos de pilotes con espaciamentos centro a centro tan grandes que la interacción es insignificante.

Figura 1.18: Curva $p-y$ para pilote individual y Curva $p-y$ para pilote en un grupo



Fuente: Adaptado de Viggiani et al. (2012)

En la Figura 1.19 se muestra el esquema en planta de un grupo de pilotes sobre los cuales se impone una carga horizontal cuya dirección es paralela al eje x y perpendicular al eje y , los ejes se dibujan en la misma figura. Con relación a la dirección de aplicación de la carga, en el grupo de pilotes se distingue una fila trasera, una fila delantera y unas filas intermedias. Sobre los multiplicadores f_m para curvas $p-y$, algunos investigadores sugieren las siguientes observaciones:

- El espaciamento entre pilotes en un grupo se expresa como un múltiplo del diámetro de los pilotes y se mide centro a centro
- Como se muestra en la Figura 1.19, los multiplicadores se pueden definir para filas perpendiculares a la dirección de aplicación de la carga, por eso en la figura se definen los multiplicadores f_{m1} al f_{m6}
- Los multiplicadores entre pilotes de una misma fila son insignificantes
- A partir de la fila delantera y después de la tercera fila, se aplica el mismo multiplicador, excepto a la fila trasera, en la Figura 1.19 esto significa que $f_{m4}=f_{m5}$
- Si el espaciamento entre pilotes en la dirección de la aplicación de la carga, es decir en la dirección x de la figura mencionada, es mayor a $6D$, la interacción entre pilotes se considera insignificante y el valor de los multiplicadores se puede tomar como la unidad, es decir $f_{m1}=f_{m2}=f_{m3}=f_{m4}=f_{m5}=f_{m6}=1$

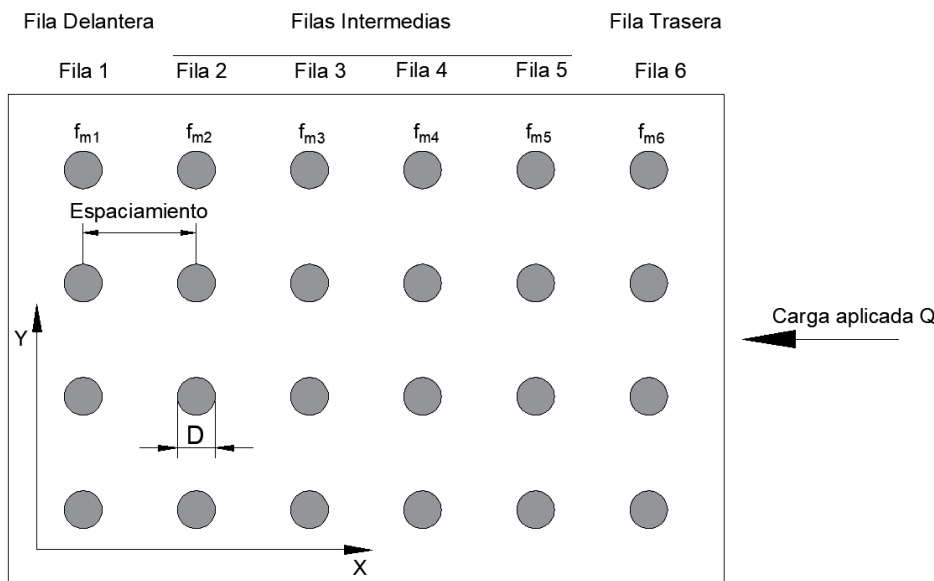
- Si el espaciamiento entre pilotes en la dirección ortogonal a la aplicación de la carga, es decir en la dirección y de la Figura 1.19, es mayor a $4D$, la interacción entre pilotes es insignificante y el valor de los multiplicadores se puede tomar como la unidad, es decir $f_{m1}=f_{m2}=f_{m3}=f_{m4}=f_{m5}=f_{m6}=1$
- Si el espaciamiento entre pilotes en la dirección ortogonal a la aplicación de la carga, es decir en la dirección y de la Figura 1.19, es mayor a $4D$, la interacción entre pilotes es insignificante y el valor de los multiplicadores se puede tomar como la unidad, es decir $f_{m1}=f_{m2}=f_{m3}=f_{m4}=f_{m5}=f_{m6}=1$
- En la mayoría de los casos el multiplicador de los pilotes de la fila delantera es $f_{m1}=1$, lo que significa que los pilotes localizados en esa fila se desempeñan como un pilote individual
- Los multiplicadores son independientes del tipo de suelo, del tipo de pilote y del nivel de carga y dependen exclusivamente del espaciamiento entre pilotes

Con respecto a la última afirmación, se debe tener en cuenta que, entre otros, los principales factores que influyen la interacción entre los pilotes de un grupo son:

- Las propiedades mecánicas del suelo y la variación de la rigidez del suelo a profundidad
- La geometría del pilote, la geometría del grupo de pilotes, la cantidad de pilotes en el grupo y el nivel de carga en cada pilote

Abarcar todos esos factores en un único parámetro multiplicador $p-y$, no es una tarea sencilla. Según Viggiani et al. (2012), el método de la curva $p-y$ para el pilote individual y su extensión al grupo de pilotes es un procedimiento empírico y tanto la forma de las curvas como sus multiplicadores solo pueden ser deducidos por experimentos *ad hoc*.

Figura 1.19: Definición de dirección de la carga y espaciamiento entre pilotes para efectos de grupo



Fuente: Elaboración propia

Al respecto de la evaluación de deformaciones en grupos de pilotes ante carga lateral, el código colombiano de puentes CCP-14, indica que los efectos de la interacción del grupo se consideran al evaluar el movimiento horizontal del grupo de pilotes. El código exige que en cimentaciones pilotadas se evalúe el movimiento horizontal inducido por cargas laterales. Para incluir los efectos de grupo, el código indica que, cuando se usa el método de análisis p - y los valores de p deben multiplicarse por los valores del multiplicador f_m organizados en la Tabla 1.1.

Espaciamiento de pilotes centro a centro en la dirección de la carga	Multiplicador f_m		
	Fila 1	Fila 2	Fila 3 y superior
3D	0.8	0.4	0.3
5D	1.0	0.85	0.7

Tabla 1.1: Multiplicadores para curvas p - y

Fuente: 10.7.2.4-1 del Código Colombiano de Puentes, 2014

Tomando como referencia la Figura 1.19, si el espaciamiento entre pilotes es $3D$ en la dirección x , entonces para la fila delantera, de acuerdo con lo que establece el CCP-14, el multiplicador vale $f_{m1}=0.8$, para las filas intermedias se tendrán los siguientes valores de multiplicadores: $f_{m2}=0.4$ y $f_{m3}=f_{m4}=f_{m5}=f_{m6}=0.3$. Si la separación entre pilotes es de 5 veces el diámetro, el CCP-14 establece que los efectos de grupo son insignificantes para la fila delantera y por consiguiente el multiplicador f_{m1} toma el valor de la unidad, para este caso, los valores de los demás multiplicadores se muestran en la Tabla 1.1. Se puede usar una interpolación lineal para establecer los valores de f_m en grupos de pilotes con espaciamientos diferentes a los de la tabla.

En el CCP-14 también se consideran grupos de pilotes con una sola fila, para estos casos se establece que si la dirección de la carga es perpendicular a la fila y si el espaciamiento entre pilotes es inferior a $5D$ solo se usa un factor multiplicador f_m menor que 1 para toda la fila, en cambio si el espaciamiento es mayor que $5D$ el multiplicador se toma como la unidad. Es necesario comentar que los valores de multiplicadores f_{mi} para curvas p - y fueron desarrollados para pilotes verticales.

Con respecto al método de los elementos de contorno (BEM) y su extensión al análisis de un grupo de pilotes, la solución se basa en la adopción de una función de Green con la cual se calcula la interacción a través del continuo elástico utilizado para modelar el subsuelo entre cada par de segmentos de pilotes. Se usa la función de Mindlin (1936) (Ver Figura 1.14), para el caso de un grupo de m pilotes divididos en n segmentos, para ello se debe ensamblar una matriz de $(n \times m)^2$ términos a fin de resolver el sistema de ecuaciones lineales conformado por las ecuaciones de equilibrio y las ecuaciones de compatibilidad de desplazamientos; por esta razón el recurso computacional para resolver el sistema de ecuaciones es enorme y el método para grupos de pilotes ante carga lateral con la metodología BEM resulta poco práctico.

1.4. Datos experimentales sobre grupos de pilotes ante carga lateral

Algunas publicaciones, resumidas más adelante, describen resultados de pruebas de carga lateral en pilotes y la mayoría tratan de pilotes individuales, los datos experimentales acerca de grupos de pilotes sometidos a carga lateral son escasos, entre los experimentos disponibles se encuentran pruebas de carga a escala real, modelos en la máquina centrífuga y modelos en miniatura desarrollados en laboratorio. Los resultados experimentales sobre pilotes bajo carga lateral muestran que la relación carga lateral-deflexión horizontal es marcadamente no lineal, incluso a bajos niveles de carga, también que el momento máximo que se desarrolla en los pilotes, se relaciona con la carga aplicada de forma lineal. En los grupos de pilotes ensayados se observa que la reacción del suelo que rodea el pilote está influenciada de forma importante por la posición del pilote en relación con la posición y la dirección de aplicación de la carga.

En Matlock, Ingram, Kelley y Bogard (1980), mostraron los resultados de las pruebas de carga en campo realizadas a un grupo de pilotes hincados en una arcilla blanda. Las características de los experimentos fueron:

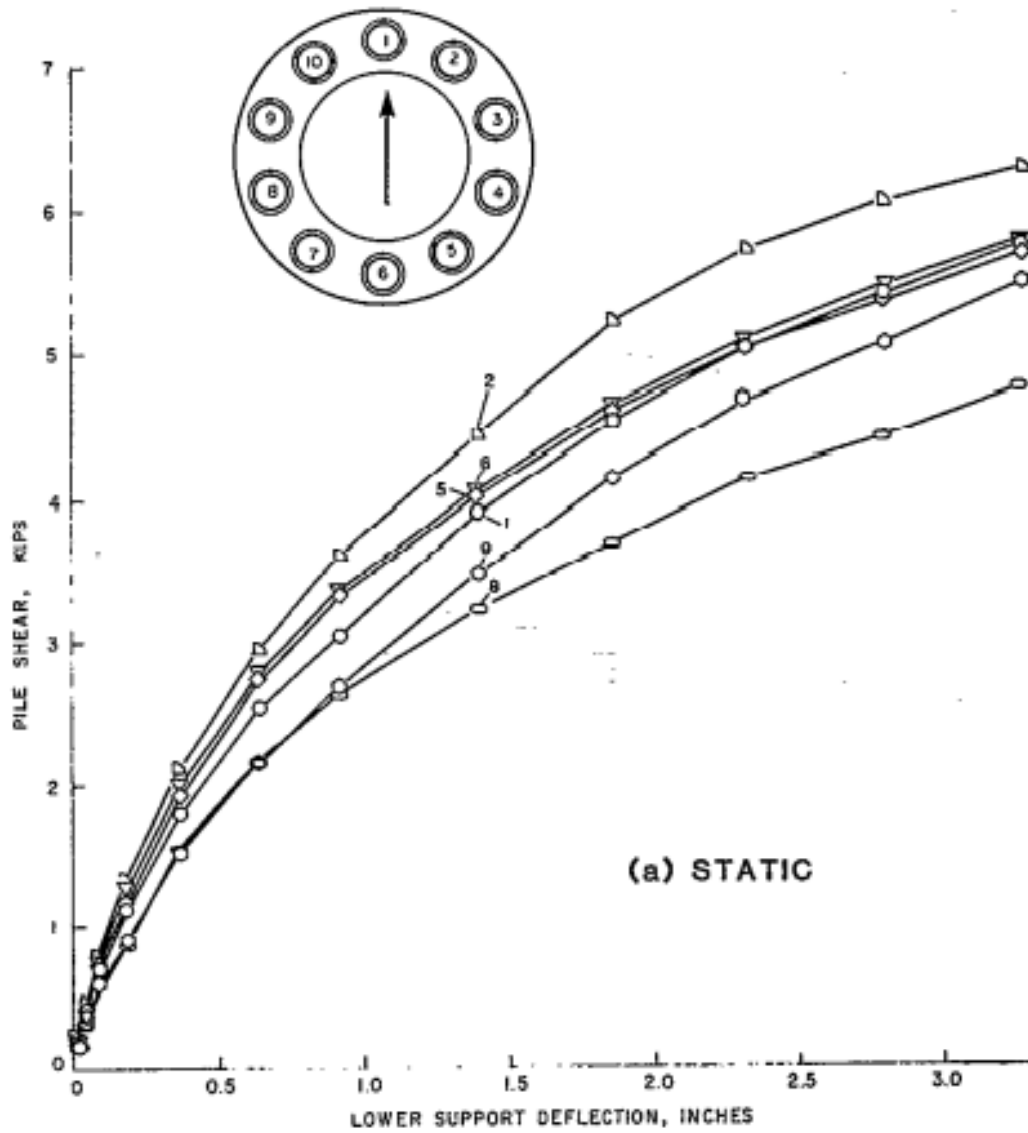
- Diámetro de los pilotes: 15.2 cm
- Longitud de los pilotes 13.7 m
- Grupo de 5 pilotes espaciados 3.4 veces el diámetro
- Grupo de 10 pilotes espaciados 1.8 veces el diámetro
- Configuración geométrica del grupo en planta: circular
- Pilotes con cabezal restringido

Se ejecutaron seis series de carga estática y cíclica, en los cuales la cabeza de los pilotes se adosó a un marco de carga y la aplicación de la carga se logró mediante el desplazamiento lateral del marco a una distancia predeterminada, transcurrido un tiempo de 10 minutos se tomó lectura de carga y momento flector de algunos transductores instalados en los pilotes.

Como se muestra en la Figura 1.20, en los experimentos se identificó una relación no lineal entre la deflexión en el cabezal de los pilotes y la carga aplicada, no obstante, para el caso de estos experimentos, no se distingue un patrón de comportamiento de los pilotes con relación a su posición dentro del grupo.

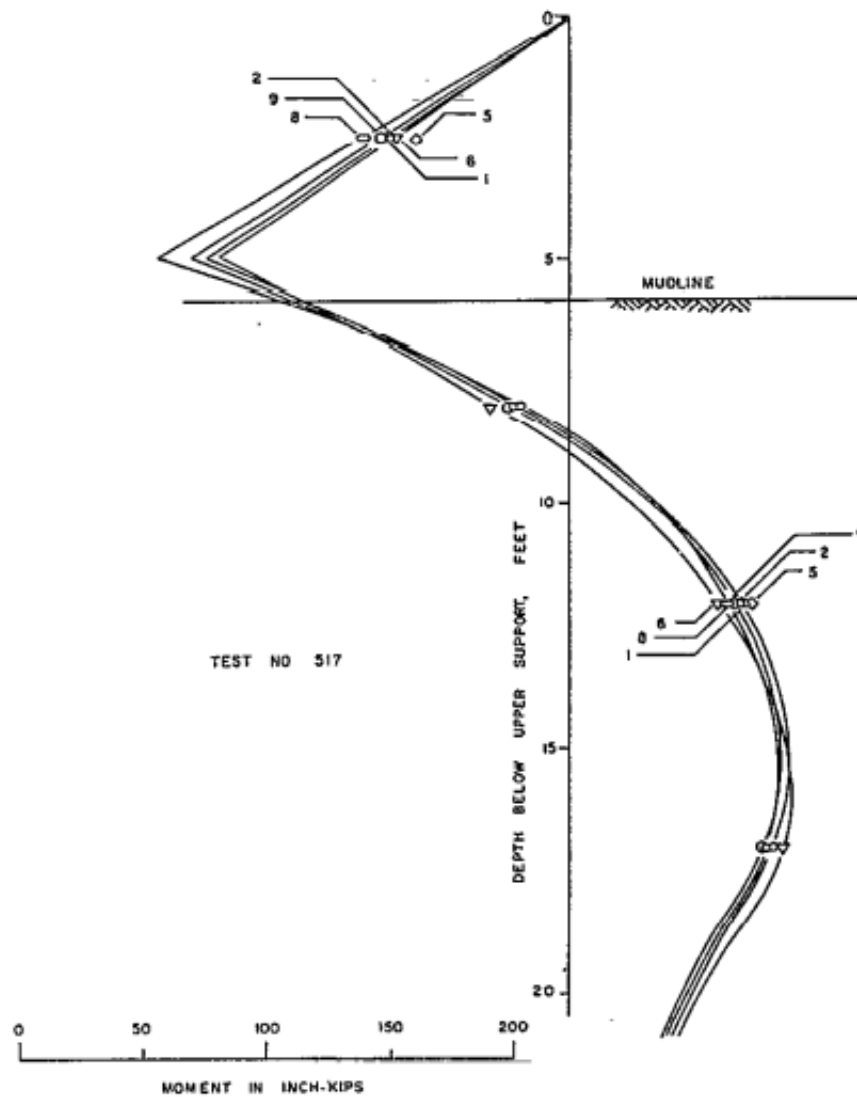
En la Figura 1.21 se muestra la variación de momento flector con la profundidad para el grupo de pilotes ensayados por Matlock et al.(1980), los autores encontraron que la variación del momento flector de un pilote con respecto al de los demás pilotes en el grupo no supera el 10%. Además, se comparó el máximo desplazamiento lateral de los grupos de pilotes con el que se obtuvo en la prueba de un pilote individual, al respecto se encontró que el desplazamiento lateral del grupo de 5 pilotes fue del doble y el desplazamiento del grupo de 10 pilotes fue del triple, ambos comparados con el desplazamiento del pilote individual. Con respecto a la forma de aplicación de la carga, se encontró que la resistencia lateral en pilote individual es mayor para carga estática que para carga cíclica.

Figura 1.20: Comportamiento carga lateral -deflexión de grupo de 10 pilotes, experimentos de Matlock et al. (1980)



Fuente: Matlock et al. (1980)

Figura 1.21: Variación de momento flector a profundidad de grupo de 10 pilotes, experimentos de Matlock et al. (1980)



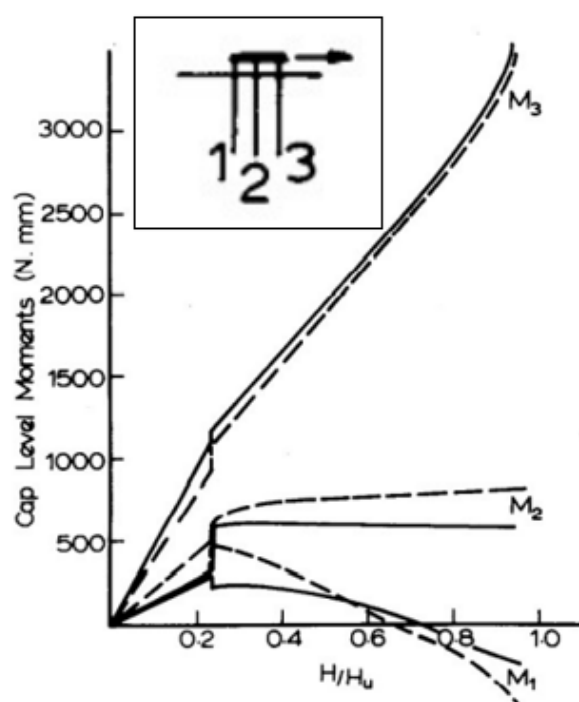
Con el objetivo de observar efectos de grupo en pilotes instalados en un tanque de arena, Selby y Poulos (1984) desarrollaron unas pruebas de carga en un modelo a escala, las características del experimento se listan a continuación:

- Pilotes de aluminio
- Grupos de 2 a 9 pilotes
- Diámetro de pilotes 16mm(1.6cm)
- Longitud de pilotes 520 mm(5.2cm)
- Separación entre pilotes $s = 1.8$ a 3.7 veces el diámetro
- Pilotes con cabezal restringido
- Configuración en planta del grupo de pilotes: cuadrada

El cabezal de los pilotes se conectó con una lámina de acero que modela el dado de cimentación, la carga horizontal se aplicó sobre la lámina luego de imponer una precarga vertical en los pilotes. En los experimentos se definió la carga de falla como aquella que causa una deflexión de 0.5 veces el diámetro de los pilotes.

Las observaciones de los experimentos llevaron a concluir que, como se observa en la Figura 1.22, con relación a la localización de la carga, los pilotes delanteros, como el pilote 3 en la figura, cargan más que los pilotes traseros y desarrollan mayores momentos flectores y mayores fuerzas de reacción en el suelo que los rodea.

Figura 1.22: Momento flector con relación a la carga horizontal aplicada, experimentos Selby y Poulos (1984)



Fuente: Selby y Poulos (1984)

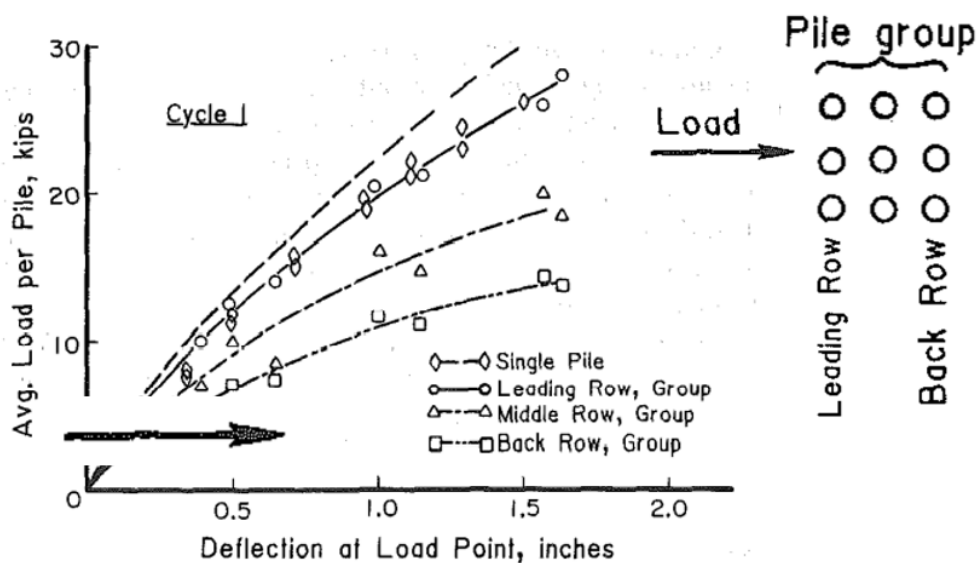
Una serie de experimentos en grupos de pilotes fueron llevados a cabo por Brown et al. (1988), los autores usaron grupos de 9 pilotes dispuestos en configuración 3X3, para estudiar el efecto de sombra. Las características del experimento fueron las siguientes:

- Suelo: arena densa $\phi=38.5^\circ$
- Grupo de 9 pilotes 3X3
- Pilotes de acero
- Diámetro de los pilotes $D=27.3$ cm
- Longitud de los pilotes 4.88m
- Espaciamiento 3 veces el diámetro
- Configuración en planta del grupo de pilotes: cuadrada

Se desarrollaron pruebas de carga lateral en un pilote individual con el fin de comparar los resultados con los obtenidos del grupo de pilotes. Los cabezales de los pilotes se

unieron a un marco de carga y las cargas se aplicaron a las cabezas de los pilotes. Con la información medida del momento flector en los pilotes se calcularon curvas $p-y$ a la profundidad del momento flector máximo de cada pilote. Entre las observaciones más relevantes los autores encontraron que el suelo cerca de la superficie es el que domina el comportamiento ante carga lateral, ya que se forman zonas de concentración de esfuerzos delante de los pilotes y para grandes desplazamientos pueden llegar a formarse cuñas pasivas.

Figura 1.23: Gráficas de carga desplazamiento lateral, experimentos de Brown et al. (1988).



Fuente: Brown et al. (1988)

En las pruebas de carga desarrolladas se encontró que el grupo de pilotes alcanza una deflexión lateral mayor que la que alcanza el pilote individual.

En la cabeza de cada pilote se instaló un transductor para medir la carga, de acuerdo con las mediciones obtenidas se pudo establecer que la carga que asume cada pilote está relacionada con la posición del pilote dentro del grupo. Como se muestra en la Figura 1.23 en los pilotes de la fila delantera o *Leading Row* se midió un valor de carga superior y por lo tanto estos pilotes desarrollaron valores de momento flector mayores los cuales a su vez son de valor similar a los del pilote individual, estas observaciones llevaron a los autores a concluir que los pilotes de la fila delantera se comportan como un pilote individual y por lo tanto, el grupo de pilotes se puede diseñar de forma conservadora analizando un pilote individual con las cargas que se esperan soportar en esa fila delantera.

Como se muestra en la Figura 1.19, en un grupo de pilotes la fila delantera y la fila trasera se definen a partir de la localización y dirección de aplicación de la carga. Los experimentos demostraron que la fuerza de resistencia del suelo que circunda un pilote en la fila trasera se reduce por la presencia del pilote delante de él, y parece que este efecto es más evidente en arenas que en arcillas. Otro efecto importante observado en los experimentos es que el momento máximo de los pilotes en la fila delantera ocurre a profundidades mayores.

Respecto al problema de pilotes ante carga lateral, no son muchos los datos experimentales sobre pruebas reales y en algunos casos la información detallada de las pruebas de carga resulta insuficiente si se quiere reproducir el experimento en un modelo numérico. Entre las pruebas de carga mejor documentadas se encuentra el caso de la evaluación de pilote individual y grupos de pilotes cargados lateralmente en el puente *Roosevelt*, desarrollado por Ruesta y Townsend (1997), en esa prueba, un pilote individual y un grupo de pilotes, cimentados en arena, se sometieron a carga lateral en el cabezal hasta la falla. De la prueba se conocen: las propiedades del suelo de fundación, alguna información del material de los pilotes, la geometría de los pilotes ensayados, el valor de los incrementos de carga impuestos y la carga de falla, también los autores ponen a disposición del lector, gráficas del momento flector a lo largo del pilote cargado y la curva de carga -deflexión en el cabezal del pilote. Las características más relevantes de la prueba de carga se resumen a continuación:

- Suelo de 2 capas de arena suelta y densa, con ángulos de fricción de $\phi=30-38^\circ$ y $40-46^\circ$, respectivamente
- Se ensayó 1 pilote individual, un grupo de 4X4 pilotes de reacción y un grupo de 4X4 pilotes de prueba
- Pilotes de concreto pretensado
- Pilotes cuadrados de lado 0.76 m y longitud 16.5 m
- Separación entre pilotes de $3D$
- Carga lateral estática a incrementos de 550 kN
- En el pilote individual se impusieron cargas de 45kN y la carga de falla fue de 320 kN
- Al grupo de pilotes se impuso 9 incrementos de carga de 550 kN, la carga de falla fue de 4800 kN

Entre los hallazgos más importantes se encontró que la resistencia última del suelo en cada pilote decrece por filas de la siguiente forma: 80 % en la fila principal, 50 % en las filas intermedias, 25 % en las filas traseras. En general se encontró que la eficiencia carga-deflexión del grupo fue de 80 %, es decir para obtener la curva $p-y$ del grupo se debe multiplicar la curva $p-y$ de pilote individual por 0.8.

Los resultados de momento flector a lo largo de los pilotes arrojaron que el comportamiento de los pilotes de la fila delantera es similar al comportamiento del pilote individual y que los pilotes de la fila delantera se cargan más que los pilotes de las filas traseras.

Como se ensayaron grupos de 4X4, se observó que los pilotes situados en el perímetro del grupo se cargan más que los situados dentro del grupo ya que los transductores mostraron mediciones de carga de magnitud superior respecto a los demás pilotes en el grupo.

En Ochoa y O'Neill (1989) quisieron obtener factores de interacción a partir de pruebas sobre grupos de pilotes en suelo arenoso subyacente por una arcilla rígida. Los datos relevantes del experimento fueron:

- Pilotes de acero hincados
- Pilotes con cabeza libre

- Primer experimento con grupo de 2 pilotes y espaciamiento de $3D$
- Segundo experimento con grupo de 3 pilotes y espaciamiento de $3D$
- Grupo total de 9 pilotes en arreglo de 3×3
- Longitud de Pilotes: 12.8 m
- Diámetro: 0.273 m
- Carga estática y carga cíclica

Los autores calcularon los factores de interacción α_{ij} como la medida del desplazamiento adicional producido en la cabeza del pilote i debido a la carga en el pilote j , relativo a la dirección ji (ambos pilotes cargados).

Entre los resultados más importantes encontraron que los factores α_{ij} dependen de la dirección del pilote i con respecto al pilote j y la dirección del vector de carga. También encontraron que α_{ij} es proporcional a la carga aplicada y que, respecto al ángulo de partida, la relación no es simétrica.

En los experimentos se pudo observar el “efecto sombra”, en el cual el movimiento hacia adelante del pilote de la fila delantera libera confinamiento del suelo detrás de él, y de esta forma provee resistencia pasiva al pilote trasero reduciendo significativamente la reacción del suelo, y de esta forma incrementa la flexibilidad en el pilote trasero. Existen algunos otros experimentos sobre grupos de pilotes sometidos a carga lateral, la mayoría orientados a estimar valores de los factores de interacción o encontrar valores apropiados para multiplicadores en curvas $p-y$, la mayoría de estos experimentos se han realizado en suelo de tipo granular, en suelos de tipo cohesivo parece que el proceso constructivo influye de forma importante en los resultados.

1.5. Método de elementos Finitos

El método de los elementos finitos es un método numérico que permite resolver de forma aproximada problemas de condiciones de frontera, los cuales se componen de una o varias ecuaciones diferenciales y una serie de restricciones conocidas como condiciones de frontera. La solución de estos problemas debe satisfacer tanto la ecuación diferencial como las condiciones de frontera.

Para resolver un problema de valor en la frontera mediante el método de los elementos finitos se deben desarrollar los siguientes pasos:

- Discretizar, es decir dividir el dominio del sistema en elementos de tamaño finito los cuales se definen a partir de un conjunto de nodos
- Encontrar una solución aproximada del problema de condiciones de frontera en los nodos
- Interpolarse el valor de la solución en el interior de los elementos a partir de los valores encontrados en los nodos, esto se hace a través de una función de interpolación

La función de aproximación de un elemento se escribe como:

$$\phi^e = \sum_{i=1}^n N_i \phi_i \quad (1.27)$$

Donde:

ϕ^e Es la función de aproximación de un elemento

N_i Son las funciones de interpolación o de forma

ϕ_i Es el valor nodal de la función de aproximación en el nodo i

Se debe definir una función de interpolación por cada nodo, además las funciones de forma al ser evaluadas deben tomar el valor de 1 en el nodo donde están definidas y cero en los demás nodos.

Los elementos finitos se tipifican por su forma y el número de nodos que los conforman. Los elementos sólidos tridimensionales de PLAXIS 3D® son de tipo tetraedro de 10 nodos, para simular interacción suelo –estructura se usan comúnmente elementos tipo interfaz bidimensionales de 12 nodos y para elementos lineales se usa elementos de 2, 3 y 5 nodos.

Los grados de libertad de los nodos corresponden a las componentes de los desplazamientos en un sistema de referencia ortogonal local (ξ, η, ζ) . Con todas las ecuaciones de los elementos se ensambla la ecuación general del sistema, conocida como sistema de ecuaciones nodales, el sistema de ecuaciones resultante se resuelve y se obtienen las deformaciones y los esfuerzos en cada elemento. Para calcular las componentes cartesianas de la deformación de cada elemento a partir de los desplazamientos, se derivan las funciones de forma con respecto al sistema de referencia global (x, y, z) . A partir de las deformaciones y las ecuaciones constitutivas se calcula el tensor de esfuerzos en cada uno de los elementos.

Capítulo 2

MODELO DE ANÁLISIS EN ELEMENTOS FINITOS

2.1. Dimensiones de los pilotes

En el Capítulo 1.2.2 se presentó la metodología propuesta por Brinch Hansen (1961), para ilustrarla, se va a suponer un pilote 0.6 m de diámetro, empotrado en el suelo una distancia de 10 m, donde la carga se aplica sin excentricidad en el cabezal del pilote y no se tiene sobrecarga en la superficie. El suelo de fundación es un suelo granular con 30° de ángulo de fricción y $19 \text{ kN}/\text{m}^3$ de peso unitario, para los cálculos se supone el ancho del pilote igual al diámetro.

Por medio de la Ecuación 1.1 y la Figura 1.4, se calculan los valores de esfuerzo de reacción alrededor del pilote para 10 puntos igualmente espaciados:

$z(\text{m})$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
z/D	0,00	1,67	3,33	5,00	6,67	8,33	10,00	11,67	13,33	15,00	16,67
K_q	5	7	8	9	10	10,5	11,5	12	12,1	12,5	13,05
$\gamma z D K_q (\text{kN}/\text{m}^2)$	0	80	182	308	456	599	787	958	1104	1283	1488

Tabla 2.1: Cálculo del diagrama de presiones del pilote, aplicación de metodología Brinch Hansen (1961)

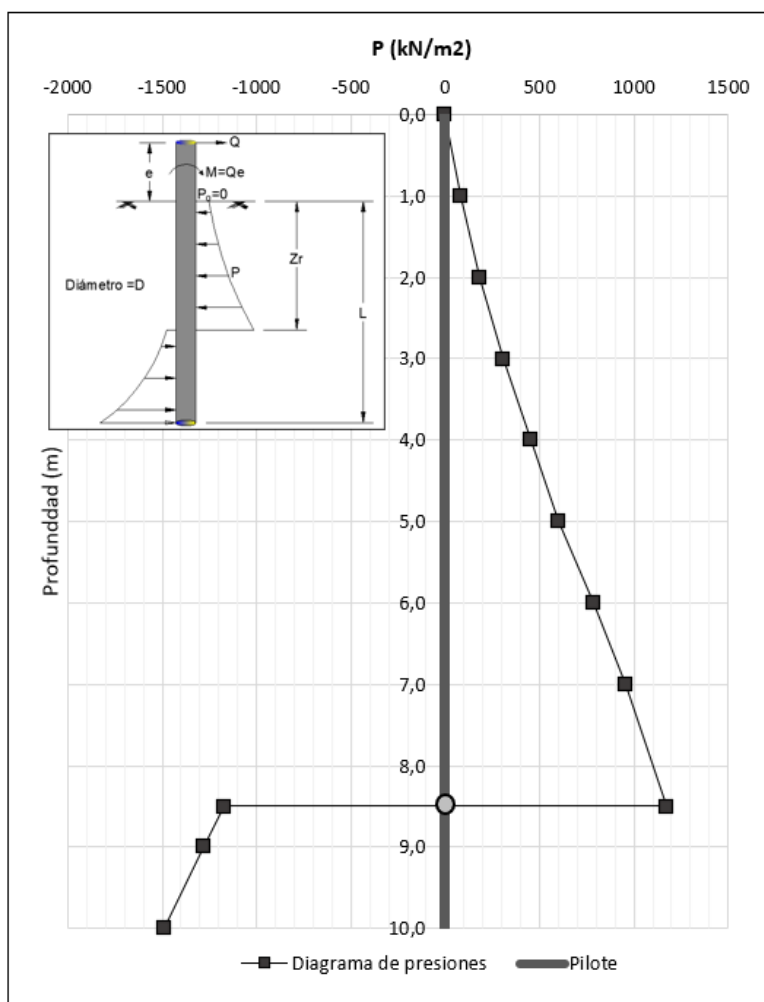
El diagrama de presiones calculado se muestra en la Figura 2.1. La profundidad del punto de giro (Z_r) debe suponerse y por iteración encontrar la profundidad para la cual las áreas de presión resulten en equilibrio de momentos con respecto al punto de aplicación de la carga Q en el cabezal.

En la Figura 2.1, el equilibrio implica que la sumatoria de momentos sea cero. Se debe comentar que, el diámetro debe estimarse con anticipación para que el momento de fluencia de la sección del pilote no sea superado. Para la aplicación, se supone que el punto de giro del pilote ocurre a -8.5 m, realizando la sumatoria de momentos alrededor del cabezal se obtiene:

$$\sum M \cong 0$$

Con el diagrama de presiones calculado y través de la sumatoria de fuerzas alrededor del pilote se obtiene que, para garantizar el equilibrio, la fuerza que debe imponerse en el cabezal es de 1702 kN aproximadamente.

Figura 2.1: Diagrama de presiones del pilote, aplicación de la metodología de Brinch Hansen (1961)



Fuente: Elaboración propia.

Al validar la carga de falla calculada para el pilote por la metodología de Broms (1964-2) se obtiene una magnitud de 1697 kN, la aplicación de esta fuerza en el cabezal del pilote supondría que en el momento de la falla en toda la profundidad del pilote actúan los esfuerzos de fluencia y entonces el pilote se comporta como pilote corto. En ese caso, para efectos de diseño se debe aplicar un factor de seguridad apropiado a la carga Q estimada. Cuando el pilote se debe diseñar para resistir una carga Q conocida, en la metodología de Brinch Hansen, las variables desconocidas son: la longitud de empotramiento L , y la profundidad del punto de rotación Z_r .

En este trabajo se propone trabajar con pilotes largos, para tal fin se estima el momento de fluencia de la sección transversal del pilote con la metodología presentada en Reese y Van Impe (2010). Para un pilote de concreto, con acero de refuerzo, en el cual la carga axial es nula el momento máximo de fluencia se estima en 600 kN m. Usando la formulación de Broms 1964-2) se obtiene que la carga que produciría la falla en el pilote largo es de 334 kN.

Se obtuvo que para un pilote de 0.6 m de diámetro y 10 m de longitud embebido en un suelo de fundación granular con 30° de ángulo de fricción y 19 kN/m^3 de peso unitario, la carga requerida para el equilibrio, suponiendo la distribución de presiones propuesta por Brinch Hansen (1961), es de 1702 kN aproximadamente, no obstante, la aplicación de esta carga en el cabezal del pilote supondría el desarrollo de un momento flector de gran magnitud en el pilote y la falla generalizada de todo el suelo que lo rodea. Para considerar el momento de fluencia de la sección del pilote se va a imponer una carga máxima en el cabezal de 334 kN con un factor de seguridad de 2.3.

2.2. Descripción del modelo 3D

Se plantea un dominio tridimensional constituido por un cubo de $30 \times 30 \times 20 \text{ m}^3$ que modela un suelo arenoso homogéneo con las características que se resumen en la Tabla 2.2. Para el suelo se adopta el modelo elastoplástico de Mohr Coulomb.

Parámetro	Símbolo	Unidades	Valor
Peso unitario	γ	(kN/m^3)	19
Módulo Elástico	E'	(kN/m^2)	10000
Rel. Poisson	ν	--	0,25
Cohesión	c	(kPa)	0
Ángulo de fricción	ϕ	($^\circ$)	30
Dilatancia	ψ	($^\circ$)	0
Rel. vacíos	e	--	0,6
Humedad	ω	(%)	30

Tabla 2.2: Propiedades del suelo

Fuente: Elaboración propia.

La construcción de los pilotes se modela en una segunda etapa con la colocación de un volumen cilíndrico embebido al cual se le asignan las propiedades del concreto, en este sentido el pilote se modela como un elemento tridimensional tipo volumen. La interacción del pilote con el suelo circundante se modela a través de un elemento tipo interfaz.

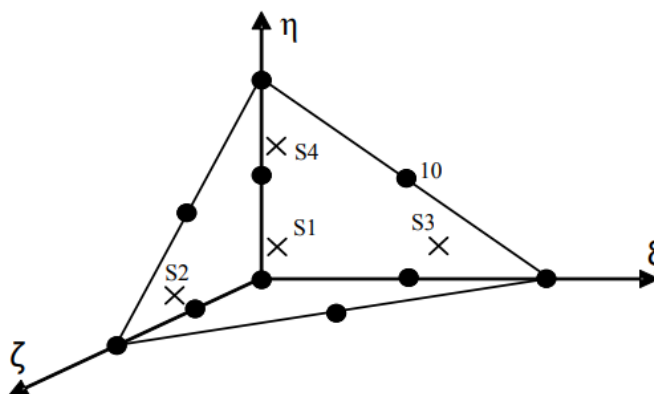
Dado que el pilote se modela como un elemento tipo volumen con características de concreto, con PLAXIS 3D[®] no es posible obtener resultados de fuerzas en elementos tipo volumen, como si es posible con elementos tipo *beam* o tipo *pile*. Por lo tanto, con el objetivo de obtener los diagramas de cortante y momento en el pilote, se inserta un elemento tipo viga en el eje axial del pilote volumétrico, esta adaptación se propuso en Dao (2011), donde se realiza la validación en PLAXIS 3D[®] de pilotes embebidos sujetos a carga lateral. Las propiedades elásticas de la viga son las mismas que las del pilote, excepto por el módulo elástico, el cual es 10^6 veces menor que el del pilote volumétrico, con esta adaptación se logra que las deformaciones de la viga sean iguales a las del pilote volumétrico. Para obtener los resultados de cortante y momento flector en el pilote, los resultados deben multiplicarse entonces por el factor 10^6 .

2.3. Ecuaciones de los elementos

Una vez definidos y ensamblados los elementos geométricos que conforman el modelo tridimensional, se procede a dividir el dominio en un número finito de elementos. Cada elemento posee un número de nodos y cada nodo tiene unos grados de libertad, en el presente trabajo los grados de libertad consisten en las componentes de desplazamiento en un sistema de referencia ortogonal xyz . En cada elemento los desplazamientos se obtienen desde los valores nodales usando funciones de interpolación conocidas como funciones de forma.

Para el caso de elementos volumétricos PLAXIS 3D[®] utiliza elementos tetraédricos de 10 nodos como el que se muestra en la Figura 2.2. Cada elemento tetraédrico tiene un sistema de coordenadas locales (ξ, η, ζ) . En la Tabla 2.3 se organizan las funciones de forma de los elementos tetraédricos, las cuales fueron evaluadas utilizando el elemento mostrado en la Figura 2.2 y se verificó el cumplimiento de las condiciones de las funciones de forma, expuestas en el Capítulo 1.5.

Figura 2.2: Elemento tetraédrico de 10 nodos



Fuente: PLAXIS 3D-Scientific Manual.

Nodo	Función de forma
N1	$(1 - \xi - \eta - \zeta)(1 - 2\eta - 2\zeta)$
N2	$\zeta(2\zeta - 1)$
N3	$\xi(2\xi - 1)$
N4	$\eta(2\eta - 1)$
N5	$4\zeta(1 - \xi - \eta - \zeta)$
N6	$4\xi\zeta$
N7	$4\xi(1 - \xi - \eta - \zeta)$
N8	$4\eta(1 - \eta - \xi - \zeta)$
N9	$4\eta\zeta$
N10	$4\xi\eta$

Tabla 2.3: Funciones de forma de elementos tetraédricos

Fuente: PLAXIS 3D-Scientific Manual.

Para los elementos interfaz PLAXIS 3D[®] utiliza elementos triangulares de 6 y 15 nodos con un sistema local de coordenadas (ξ, η) y para los elementos viga se usan los elementos lineales de 2 nodos con coordenadas (ξ) .

2.4. Malla de elementos finitos

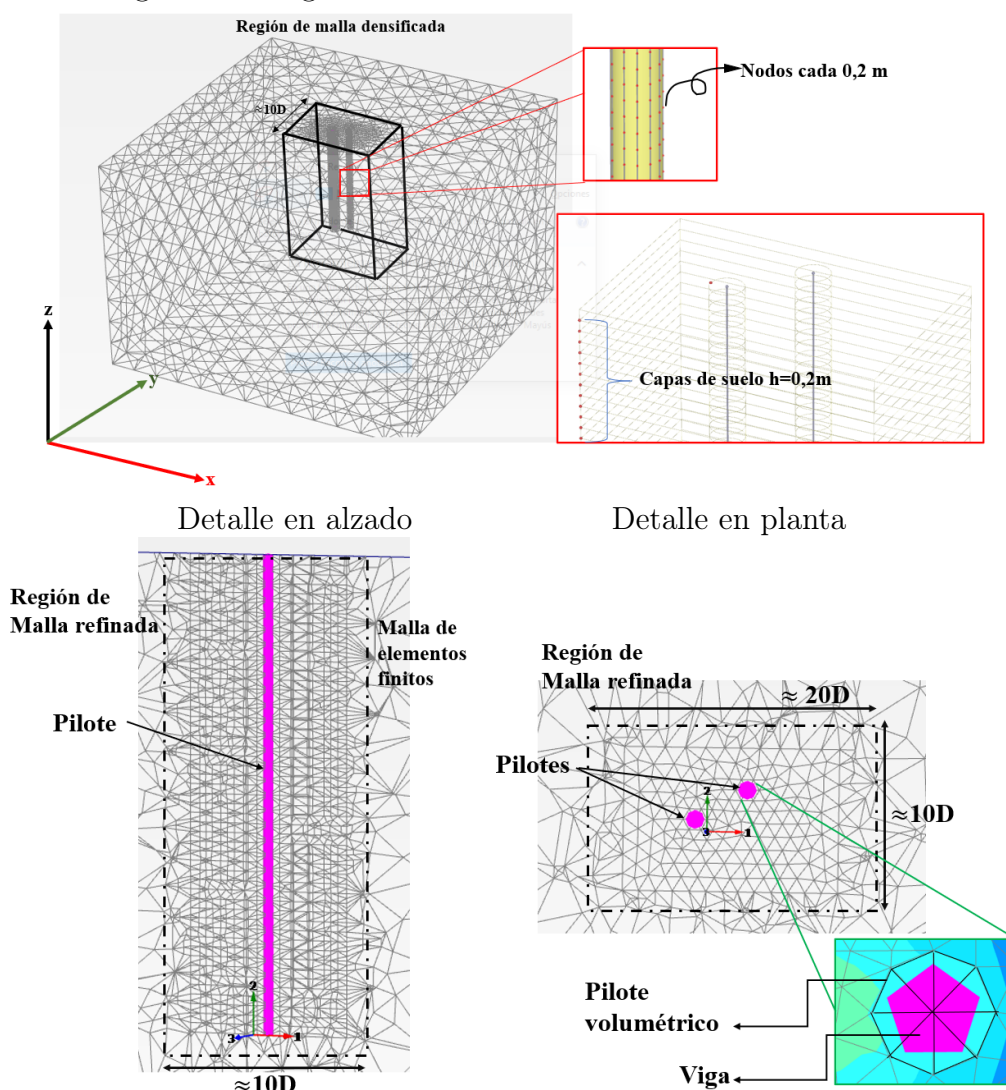
La malla es la discretización del dominio en elementos finitos. En PLAXIS 3D® el número de elementos que conforman la malla de elementos finitos depende de la geometría y de unas opciones de refinamiento local. Para lograr una buena aproximación de los cálculos los elementos que componen la malla deben ser lo suficientemente pequeños, especialmente en las áreas donde se espera tener cambios importantes en los desplazamientos y por consiguiente en las deformaciones y en los estados de esfuerzos.

En el caso del presente estudio las regiones de interés se concentran en el suelo que rodea los pilotes. Para lograr una malla refinada, en las proximidades de los pilotes se modeló el suelo en capas de 20 centímetros de espesor, de esta forma se impuso una condición geométrica con la cual se logró generar un nodo cada 20 cm en la dirección vertical del fuste de cada pilote. Implementar la densificación de la malla de esta forma en todo el dominio del modelo resulta poco práctico porque se genera un número excesivo de elementos, por lo tanto, la división del suelo en capas se realiza en una región alrededor de los pilotes cuyo ancho se definió arbitrariamente de 10 veces el diámetro, así se logra también una transición en el tamaño de los elementos de la malla de tal forma que los elementos más pequeños se localizan en las regiones de interés y su tamaño va aumentando de forma gradual hacia las fronteras del modelo.

En la Figura 2.3 se muestra la región de la malla densificada así como el detalle en planta y en alzado de la malla de elementos finitos en las inmediaciones de los pilotes.

El pilote se modeló como un elemento tipo volumen con un cilindro circular recto el cual se discretizó en elementos concéntricos, en el eje axial del cilindro se insertó una viga la cual se discretizó en 50 elementos, en la Figura 2.3 se muestra un detalle de los elementos que conforman la malla de los pilotes.

Figura 2.3: Región refinada de la malla de elementos finitos



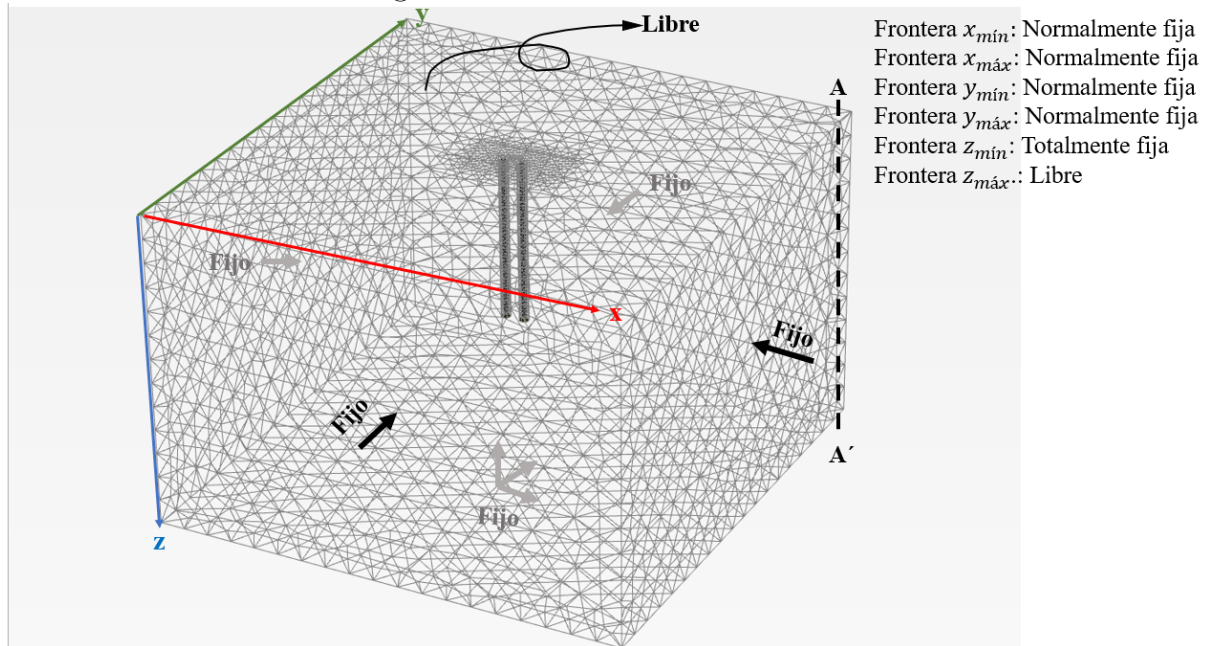
Fuente: Elaboración propia.

2.5. Condiciones de Frontera del modelo

Las condiciones de contorno consisten en restricciones permanentes aplicadas en todos los nodos de la frontera del problema. Las condiciones de frontera generales del modelo se pueden especificar para todas las etapas de modelo, imponiendo, por ejemplo, condiciones de deformación en las fronteras geométricas.

Para el caso de estudio se establecieron condiciones en los planos que conforman las fronteras del volumen de suelo, de forma que en los planos verticales se restringe el movimiento en la dirección normal al plano, en el plano horizontal inferior se restringe el movimiento en cualquier dirección y en el plano horizontal superior no se impone ninguna restricción de movimiento, en la Figura 2.4 se ilustran las condiciones de frontera impuestas al modelo de elementos finitos.

Figura 2.4: Condiciones de Frontera



Fuente: Elaboración propia.

En términos de desplazamientos, las condiciones de frontera impuestas e ilustradas en la Figura 2.4 son:

- Plano YZ $U_x=0$
- Plano XZ $U_y=0$
- Plano XY $U_x=U_y=0$

2.6. Condiciones iniciales

Al inicio del modelo todos los nodos que componen la malla de elementos finitos deben tener condiciones iniciales definidas. En el caso de estudio la condición inicial se calcula en una etapa denominada “Etapa inicial”, en la cual se calculan los esfuerzos verticales a partir del peso específico de los materiales (γ), la profundidad (z) y los esfuerzos horizontales se estiman a partir de la definición de K_0 , como se ilustra en la Ecuación 2.1.

$$\begin{aligned}
 \sigma_{zz} &= \gamma z \\
 \sigma'_{zz} &= \gamma z - P_w \\
 \sigma'_{xx} &= \sigma'_{yy} = K_0 \sigma'_{zz}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Donde:

- σ_{zz} Esfuerzo vertical total
- σ'_{zz} Esfuerzo vertical efectivo
- P_w Presión de poros
- K_0 Coeficiente de presión de tierras en reposo
- $\sigma'_{xx} = \sigma'_{yy}$ Esfuerzo horizontal

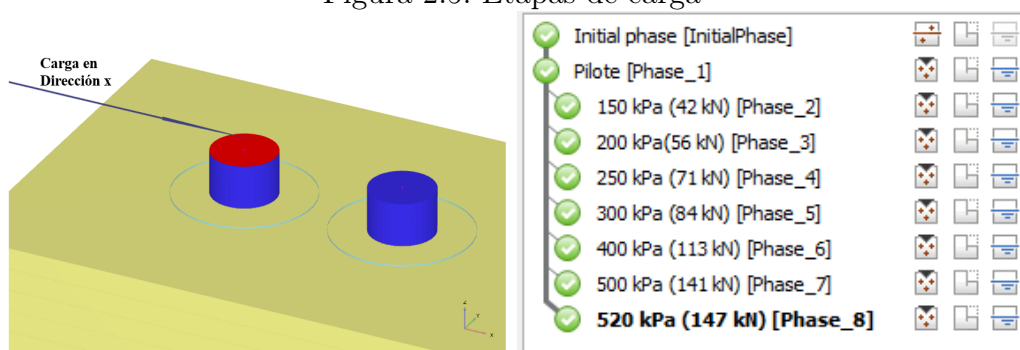
2.7. Etapas de Carga

Una vez definidos los elementos que conforman el modelo, generada la malla de elementos finitos y establecidas las condiciones de frontera y la etapa de condiciones iniciales en la cual se calculan los esfuerzos geostáticos, se procede a definir las etapas constructivas.

Como se mencionó, la construcción de los pilotes se modela con la colocación de un volumen cilíndrico embebido al cual se le asignan las propiedades del concreto, en este sentido el pilote se modela como un elemento tridimensional tipo volumen al cual se le adiciona una viga en el eje axial.

En las etapas siguientes a la construcción de los pilotes, se modela la carga la cual se simula a partir de una superficie de carga impuesta en el cabezal. En el caso de estudio se aplicó la carga horizontal en la dirección x del sistema de referencia global del modelo. Como se muestra en la Figura 2.5 se crearon varias etapas en las cuales se incrementó la magnitud de la carga aplicada de forma sucesiva.

Figura 2.5: Etapas de carga

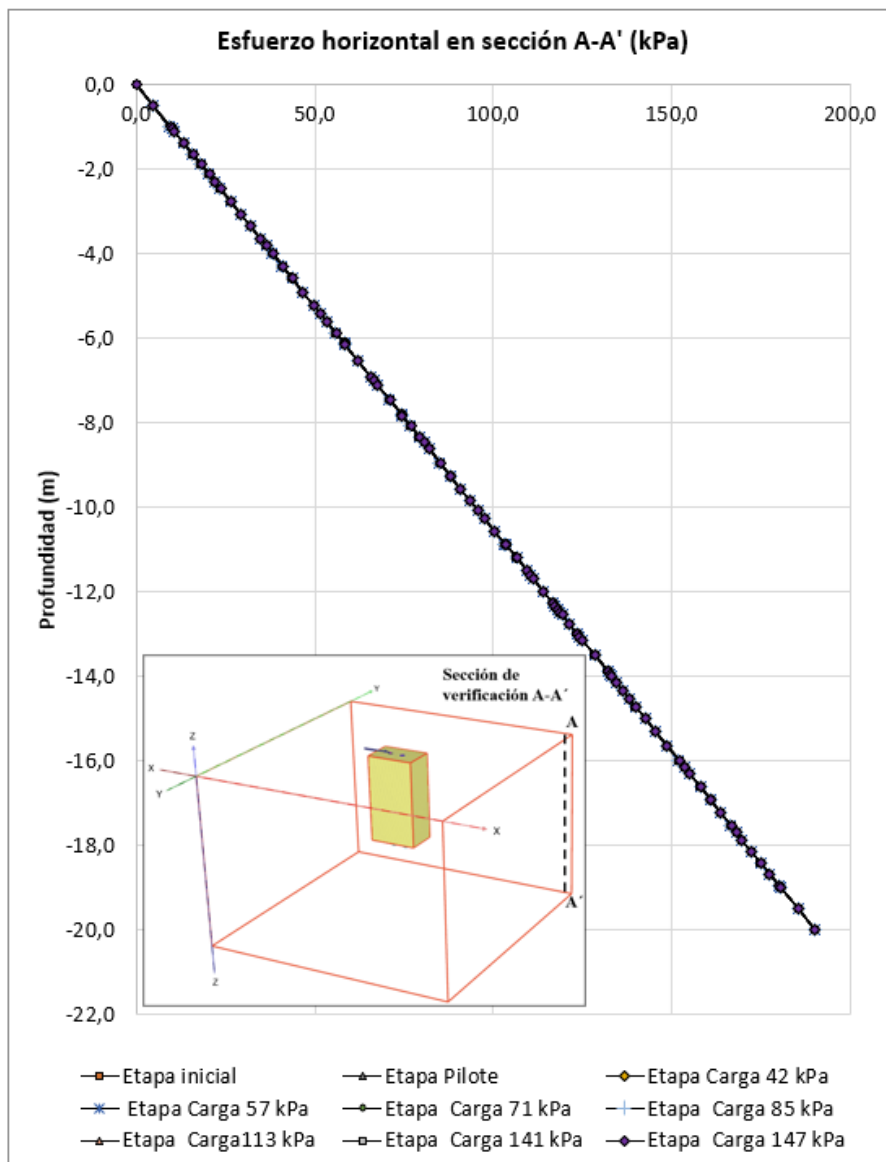


Fuente: Elaboración propia.

2.8. Verificación del tamaño del modelo

Con el fin de verificar que el tamaño del modelo es suficiente como para que no haya interacción con las fronteras, para todas las etapas del modelo se obtuvo el valor de esfuerzos horizontales en la sección A-A' señalada en la Figura 2.4, el resultado se muestra en la Figura 2.6. Se observa que, para las etapas inicial, pilotes y todas las etapas de carga, los esfuerzos en una sección cercana a la frontera del modelo corresponden siempre a los esfuerzos geostáticos, de esta forma se obtuvo el volumen que modela la masa de suelo el cual corresponde a un cubo de $30 \times 30 \text{ m}^2$ extruido en dirección z hasta una profundidad de 20 m y para el cual no existe interacción entre el sistema de pilotes y las fronteras.

Figura 2.6: Esfuerzos horizontales en la frontera del modelo para todas las etapas de análisis



Fuente: Elaboración propia.

2.9. Adaptaciones a la malla de elementos finitos

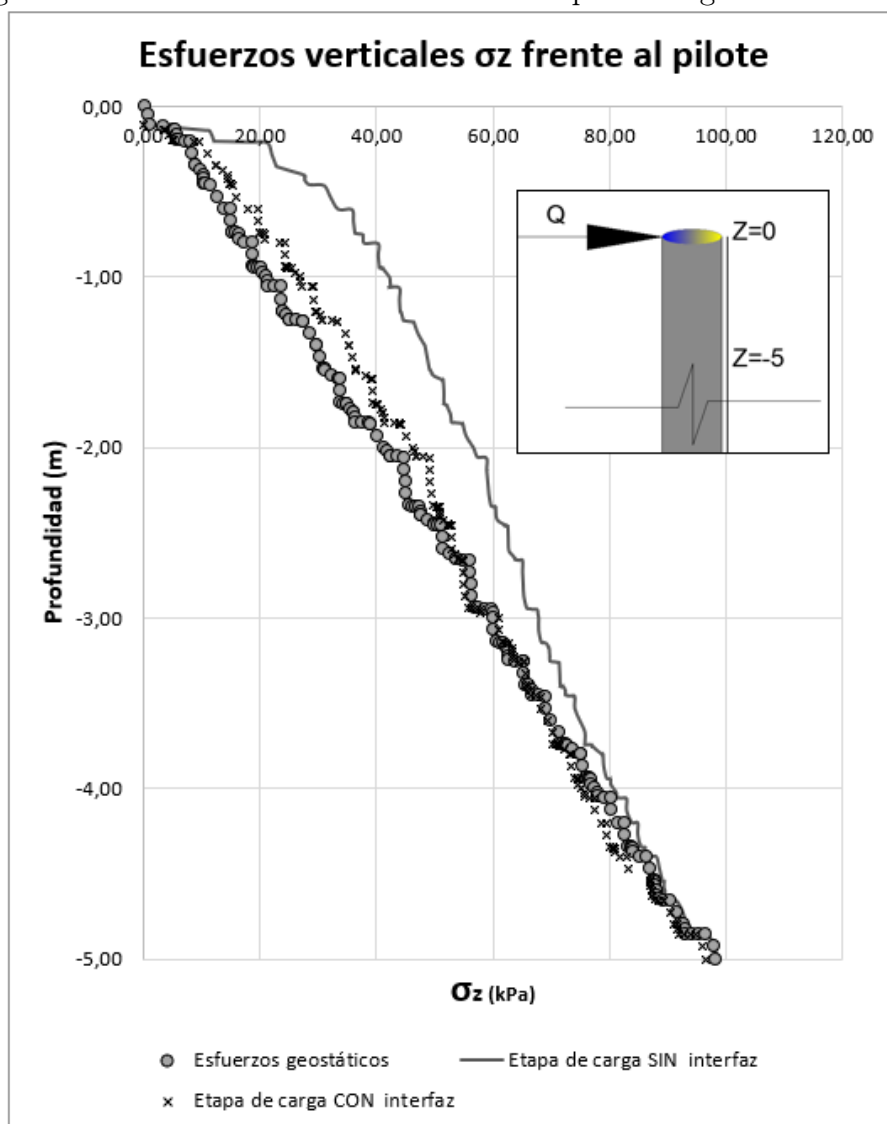
En todas las etapas del modelo se revisó el estado de esfuerzos en el suelo localizado en la vecindad del pilote, en la región cercana a la cabeza del pilote se identificó que los esfuerzos verticales delante del pilote aumentan en todas las etapas de carga. Este comportamiento en el que el suelo delante del pilote se comprime verticalmente, no está considerado en las teorías existentes sobre pilotes sometidos a carga lateral, lo que se espera en cambio, es un aumento en el esfuerzo lateral proporcional y en la misma dirección de aplicación de la carga, sin cambios considerables en los esfuerzos verticales.

En la Figura 2.7 se graficó la magnitud del esfuerzo vertical σ_z contra la profundidad del pilote hasta 5 m de profundidad en una sección frente al pilote, en la gráfica se identifica que el esfuerzo geostático en kPa corresponde a $\sigma_z = \gamma z$. En la misma curva se graficaron los esfuerzos verticales calculados en una etapa de carga lateral, se observa un aumento

de hasta 20 kPa con respecto a los esfuerzos geostáticos, este comportamiento, que como ya se mencionó ocurre en la región cercana a la cabeza del pilote, se logró mejorar implementando una adaptación a la malla de elementos finitos a través de un elemento tipo *interfaz* que simula la interacción entre el pilote y el suelo.

Tal y como en los muros de contención se puede decir que, en los pilotes sometidos a carga lateral, la interacción entre el suelo circundante y el revestimiento del pilote afecta su desempeño. En la modelación, se hace necesario implementar un elemento que plasme la interacción suelo-estructura y capture la transferencia de esfuerzos normales y cortantes a través de la discontinuidad que supone pasar del pilote al suelo, esto se logró con la interfaz.

Figura 2.7: Esfuerzos verticales al frente del pilote cargado lateralmente



Fuente: Elaboración propia.

La interfaz consiste en una superficie adosada al fuste del pilote que actúa como una “piel” y simula la interacción entre la superficie del concreto y el suelo que lo rodea. En el elemento finito, la interfaz es un elemento bidimensional que se genera a partir de un área con espesor cero. A la interfaz se le asignan propiedades de resistencia como las del

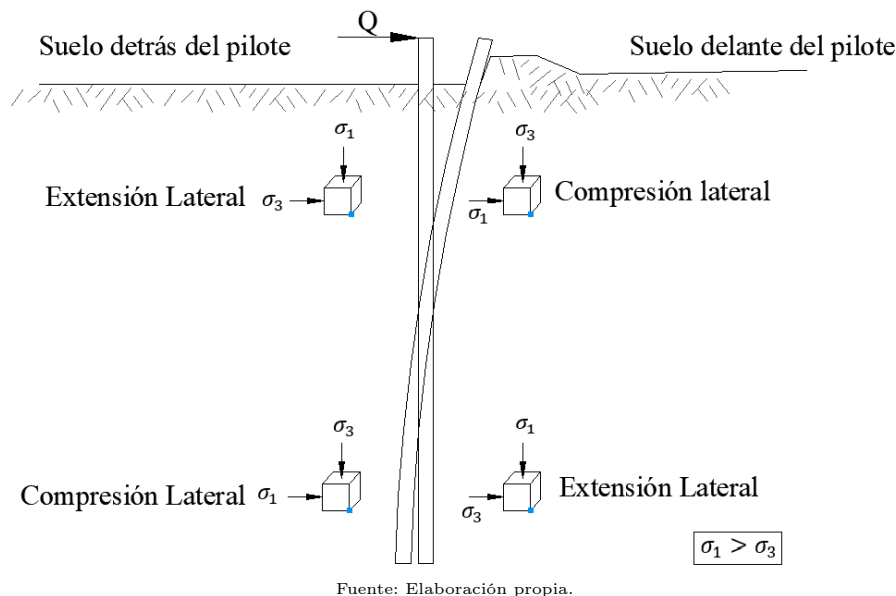
suelo circundante las cuales se afectan por un factor de reducción. A nivel de malla, en la interfaz se generan nodos compartidos entre el suelo y el pilote con el fin de garantizar la compatibilidad de esfuerzos y deformaciones. En la Figura 2.7 se muestran los resultados de esfuerzo vertical al frente del pilote habiendo implementado el uso de interfaz. Se observa que, el comportamiento de los esfuerzos verticales en la etapa de carga se asemeja más a lo esperado y corresponde en muy buena aproximación al esfuerzo geostático.

2.10. Esfuerzos horizontales en el suelo que rodea el pilote

La aplicación de la carga lateral en un pilote individual causa un desplazamiento lateral y consecuentemente un cambio en el estado de esfuerzos del suelo que circunda el pilote. Como se muestra en la Figura 2.8 en un proceso de carga horizontal, la porción del suelo frente al pilote está sometido a esfuerzos de compresión lateral en tanto que el suelo situado detrás del pilote se descarga lateralmente.

Dependiendo de la magnitud de la carga aplicada, los esfuerzos de compresión en el suelo situado frente y cerca al cabezal del pilote pueden crecer tanto e incluso alcanzar el estado de esfuerzos pasivo, así mismo, en aquellas zonas donde se da un proceso de descarga, la reducción de la magnitud de esfuerzos puede alcanzar el estado de esfuerzos activo.

Figura 2.8: Carga lateral en pilote individual: Estado de esfuerzos en el suelo que circunda el pilote

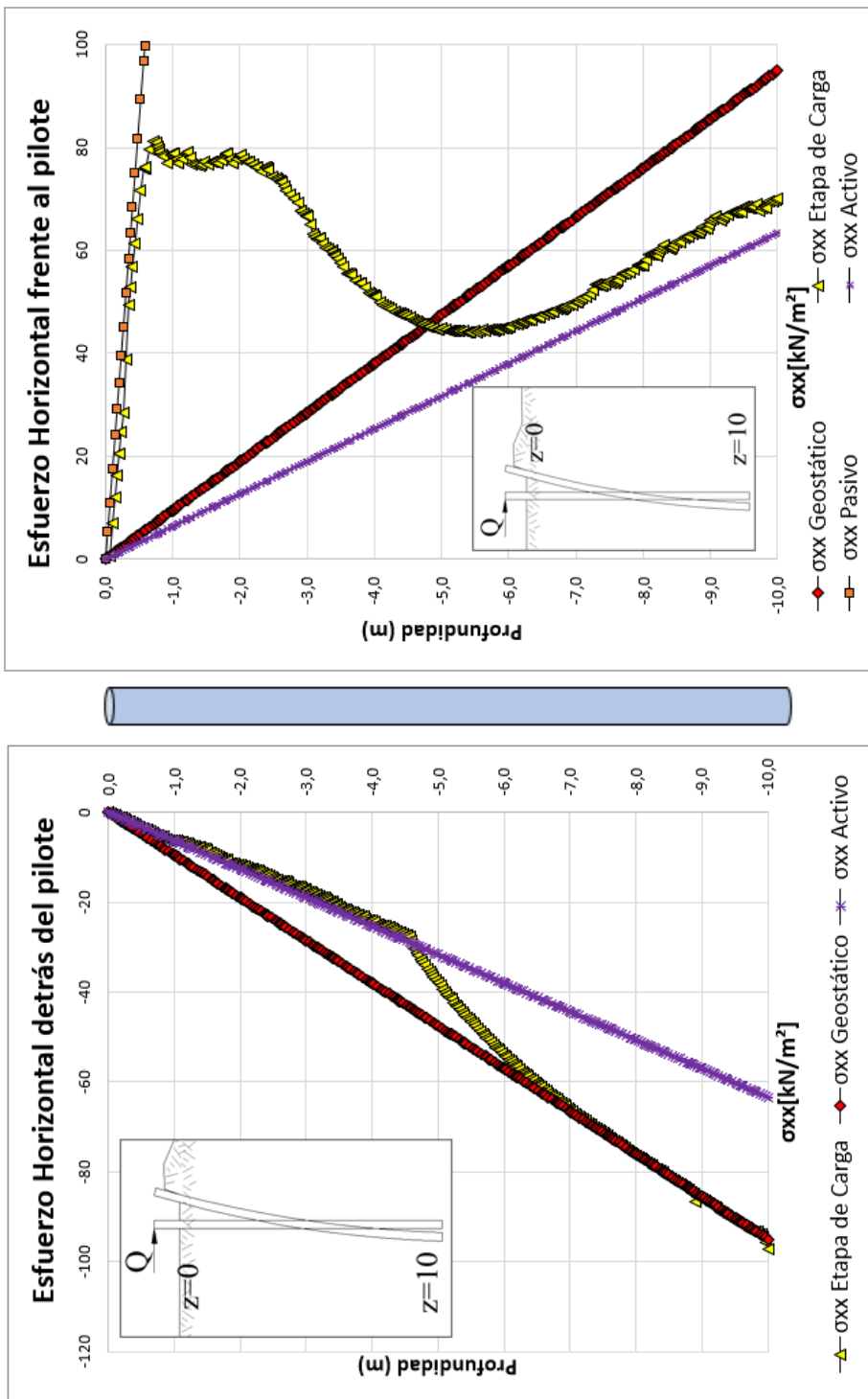


El comportamiento del suelo que rodea el pilote sometido a carga lateral ilustrado en la Figura 2.8 fue verificado en los modelos de elementos finitos habiendo implementado el uso de la interfaz suelo-pilote. En la Figura 2.9 se muestra la magnitud del esfuerzo horizontal en el suelo situado frente y detrás de un pilote cuando sobre éste se aplica una carga lateral en el cabezal. En las mismas figuras se graficaron los esfuerzos horizontales geostáticos, activo y pasivo, los puntos de las curvas mostradas en la Figura 2.9 fueron obtenidos a partir de un modelo de elementos finitos del presente estudio.

De la Figura 2.9 se observa que, si el pilote es suficientemente largo, la región del suelo localizada en la base del pilote y frente al mismo sufre un proceso de descarga y su estado de esfuerzos tiende hacia el esfuerzo activo sin llegar a alcanzarlo, contrario a lo que sucede en los puntos localizados cerca al cabezal, allí, dependiendo del valor de la carga aplicada, el esfuerzo horizontal llega a tomar valores tan altos como los del empuje pasivo.

En la región de suelo situada por detrás del pilote y cerca al cabezal, el esfuerzo horizontal alcanza el estado activo, pero a medida que se avanza en profundidad la magnitud del esfuerzo horizontal no cambia con respecto al valor del esfuerzo geostático.

Figura 2.9: Carga lateral en pilote individual: Esfuerzos horizontales en el suelo que circunda el pilote



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, es claro que, ante un proceso de carga lateral, las deformaciones que ocurren en el suelo que rodea un pilote no son las mismas delante o detrás del pilote, cerca al cabezal o cerca a la base, las gráficas obtenidas y mostradas en la Figura 2.9 muestran que la implementación de la interfaz y la modelación del pilote como un elemento volumétrico permiten simular el comportamiento que se espera de este tipo de cimentación sometida a carga lateral.

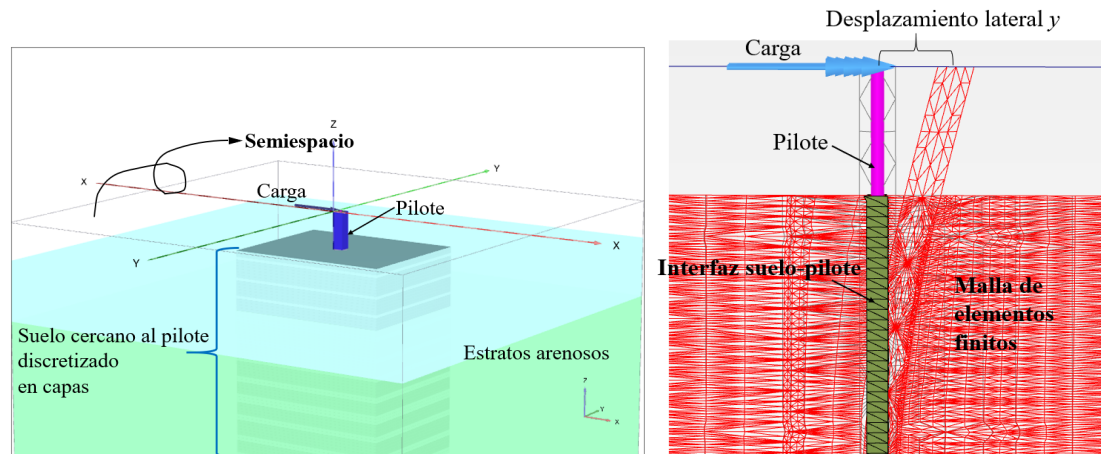
Es necesario comentar que, las deformaciones necesarias para alcanzar el estado de esfuerzos pasivo son mucho mayores que las necesarias para alcanzar el estado activo y que en análisis de desplazamientos de pilotes ante carga lateral, siempre se considera la compatibilidad entre las deformaciones del pilote y las del suelo, lo que implica suponer que el suelo siempre está en contacto con el pilote es decir adherido al fuste, como consecuencia no se considera el hecho de que por el desplazamiento lateral del pilote el suelo llegue a desprenderse en la región cercana al cabezal.

2.11. Calibración experimental

El proceso de simulación de pilotes cargados lateralmente parte de la calibración del modelo a partir de datos experimentales medidos en un caso real. Se seleccionó el caso de la evaluación de pilote individual y grupos de pilotes cargados lateralmente en el puente Roosevelt (Ruesta y Townsend, 1997). La selección del caso real para reproducir en el modelo de elementos finitos se basa en la disponibilidad de información acerca de los detalles del experimento. Para el caso del puente Roosevelt, se conocen las propiedades del suelo de fundación y alguna información del material de los pilotes, la geometría de los pilotes ensayados, el valor de los incrementos de carga impuestos y la carga de falla. Con el fin de verificar la calidad del modelo mediante la comparación de los resultados obtenidos con resultados experimentales, se buscó reproducir las características del ensayo real en el modelo de elementos finitos y se obtuvieron las curvas de variación del momento flector a lo largo del pilote para una carga dada y también la curva carga-desplazamiento en el cabezal. En la Figura 2.10 se muestra la configuración del modelo de elementos finitos y un detalle del modelo en la etapa de carga donde se observa el desplazamiento lateral del pilote.

El modelo consiste en un suelo de dos capas de arena, la capa superior tiene un espesor de 4 m de arena suelta con ángulo de fricción de 30° , peso unitario de $18.7 \text{ kN}/\text{m}^3$ y módulo de elasticidad de $10000 \text{ kN}/\text{m}^2$, la capa inferior de suelo consiste en una arena muy densa con 40° de ángulo de fricción, peso unitario de $21 \text{ kN}/\text{m}^3$ y módulo elástico 10 veces superior al módulo de la capa de arena superior. El pilote es de concreto pretensado, sección cuadrada de 0.76 m de lado y 16.5 m de longitud. Los incrementos de carga impuestos en el cabezal fueron de 45 kN y la carga de falla alcanzada en el experimento fue de 320 kN. El valor del momento flector máximo alcanzado con la carga de falla fue de 1400 kN-m con alrededor de 0.1 m de desplazamiento lateral en el cabezal. En el modelo de elementos finitos se utilizó el modelo de falla Mohr Coulomb para simular el comportamiento del suelo.

Figura 2.10: Modelo de elementos finitos para reproducir la prueba de carga del puente Roosevelt



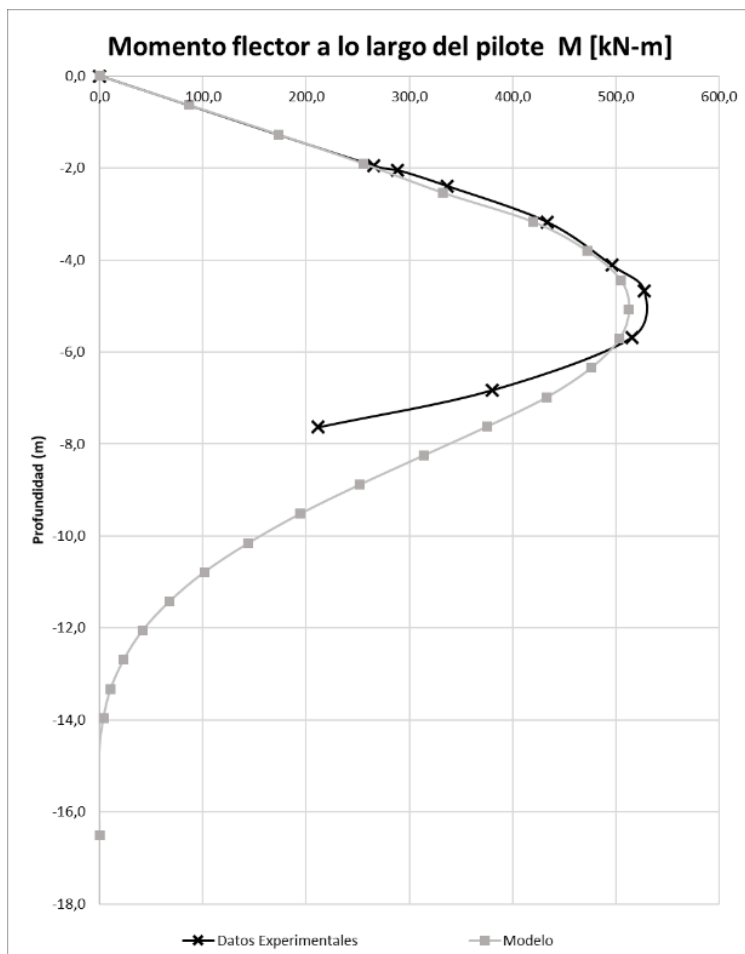
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2.11 compara los datos experimentales del valor de momento flector a lo largo del pilote con los obtenidos a partir del modelo de elementos finitos, los datos graficados corresponden a una carga impuesta de 138 kN, ya que es el valor de la carga para la cual se tienen los datos experimentales del momento flector; el valor del momento máximo obtenido con el modelo de elementos finitos difiere en un 3% respecto al valor del experimento; en ambos casos, la profundidad a la cual ocurre el momento máximo es de 5 m medidos desde la punta superior del pilote. Para el caso experimental no se tiene registro del valor del momento después de los 8 m de profundidad, los datos mostrados en la Figura 2.11 corresponden a los mostrados en la figura 10 del artículo de Ruesta y Townsend (1997).

En el artículo se presentan las gráficas de carga contra deflexión medidas en el cabezal del pilote, los datos se graficaron junto con los obtenidos a partir del modelo de elementos finitos, los resultados se muestran en la Figura 2.12.

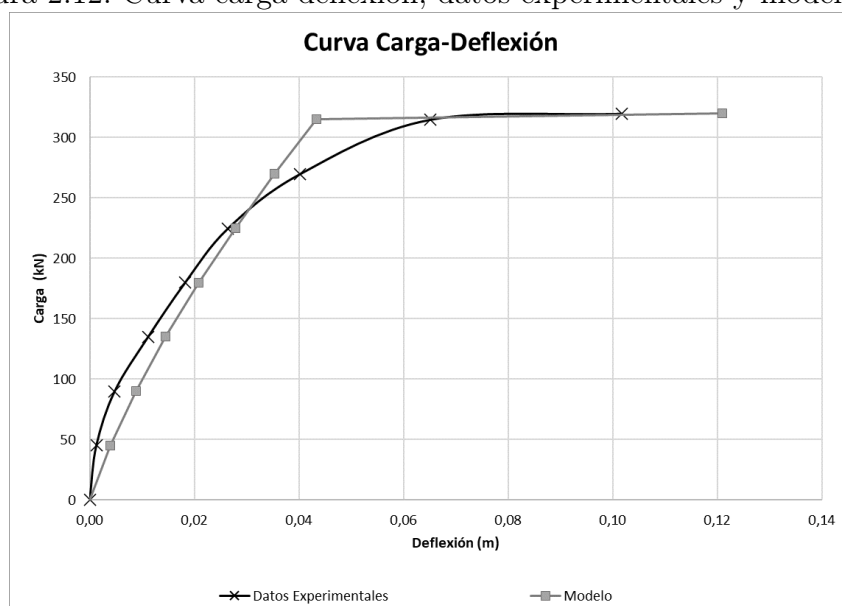
Los datos de la Figura 2.12 muestran que, para niveles de deflexión inferiores a los 0.04 m, se obtuvo una buena aproximación del modelo de elementos finitos al modelo experimental, el modelo de elementos finitos corre hasta una etapa de carga de 315 kN que es 1.6% menor que la carga de falla real, para valores superiores de carga, los nodos en el cabezal del pilote en el modelo presentan deformaciones excesivas. Con esta comprobación se buscó reproducir un caso real de pilote sometido a carga lateral para implementar el modelo de elementos finitos al estudio de este problema. Para la etapa de carga máxima alcanzada en el modelo, la cual fue de 315 kN, se obtuvo el valor de momento flector en el pilote de 1304 kNm, valor que difiere en un 7% con respecto al momento flector máximo alcanzado en el pilote real.

Figura 2.11: Momento flector a lo largo del pilote, datos experimentales y datos de modelación



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.12: Curva carga deflexión, datos experimentales y modelación



Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 3

INFLUENCIA DE UN PILOTE CARGADO LATERALMENTE SOBRE LOS PILOTES ADYACENTES EN UN GRUPO

Con el fin de estudiar la influencia que ejerce un pilote sometido a carga lateral sobre los pilotes vecinos en un grupo de pilotes, se ensamblaron modelos basados en el uso de elementos finitos. Los modelos consistieron en grupos de dos pilotes con diferentes separaciones centro a centro y diferentes condiciones de restricción en el cabezal, para ello se ensamblaron modelos con cabezal libre y otros donde la cabeza de los pilotes se conectó a través de una losa de concreto; también se corrieron modelos de pilotes con cabezal libre donde se varió el ángulo de partida β . En todos los casos se obtuvieron los diagramas de cortante y momento flector en los pilotes.

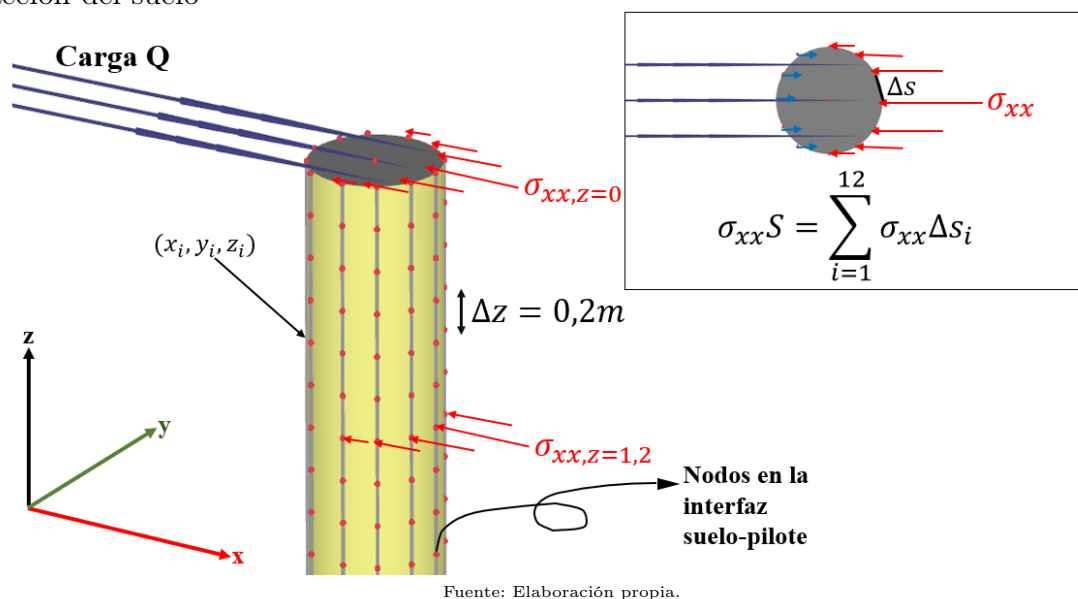
Con el objetivo de estimar los módulos de reacción horizontal, se obtuvieron las fuerzas de reacción horizontal en la interfaz suelo-pilotes. Los modelos consisten en grupos de 2 pilotes de sección circular, de 0.6 m de diámetro y 10 m de longitud. Debido al recurso computacional que requiere correr modelos con un número mayor de pilotes, no fue posible reproducir grupos numerosos de pilotes, entre otras cosas porque para obtener mejores resultados de los esfuerzos y deformaciones en el suelo que circunda cada pilote, fue necesario densificar la malla de elementos finitos en estas regiones.

Se identificó que la calidad del análisis de pilotes usando modelos de elementos finitos está asociada al tamaño de los elementos que rodean el pilote ya que, en estas regiones se espera que ocurran los cambios más significativos de esfuerzos y desplazamientos. Debido a la diferencia significativa entre la magnitud del volumen que simula el pilote y la del volumen que simula el suelo que lo circunda, el cambio de tamaño de la malla de elementos finitos al pasar del pilote al suelo genera la necesidad de densificar la malla en esas regiones, esto con el fin de lograr un cambio gradual y progresivo en el tamaño de los elementos y a la vez obtener resultados confiables. El proceso de densificación del mallado obliga a utilizar un número muy grande de elementos, en consecuencia, el procesamiento requerido sobrepasa la capacidad de cálculo de los computadores disponibles aun siendo relativamente potentes. Debido a esto, no fue posible analizar grupos de pilotes completos y en cambio se analiza la interacción entre pilotes adyacentes.

Para los elementos tipo volumen el programa PLAXIS 3D® entrega información de los esfuerzos nodales, estos datos se utilizan para estimar la fuerza de reacción en los elementos de suelo que rodean cada pilote. Para este fin se extrajo la información de esfuerzos en los nodos de la interfaz suelo pilotes localizándolos con coordenadas (xyz) como se muestra en la Figura 3.1.

Para calcular la fuerza de reacción en el suelo que rodea los pilotes se integró el esfuerzo en el perímetro y la longitud del pilote, este procedimiento está bien documentado en el trabajo de grado de Méndez (2017) y consiste en obtener la fuerza de reacción del suelo a partir de la información de los esfuerzos horizontales que actúan alrededor del pilote y en la misma dirección de aplicación de la carga. El pilote se divide en elementos de altura Δz y se obtiene la fuerza por unidad de longitud en [kN/m] que actúa en el perímetro del elemento, luego se integra a lo largo de toda la longitud del pilote para encontrar la fuerza en unidades de [kN]. En los modelos, los pilotes se dividieron longitudinalmente en 50 tramos de 0.2 m de altura como se muestra en la Figura 3.1. La convención adoptada es tal que: el pilote 1 corresponde al pilote cargado y el pilote 2 corresponde al pilote vecino. En la Figura 3.2 se observan los 50 puntos de integración en la gráfica que muestra la reacción del suelo con la profundidad.

Figura 3.1: Localización de nodos en la interfaz suelo-pilotes y cálculo de la fuerza de reacción del suelo



3.1. Ecuación de la viga

Dado que el pilote como elemento estructural se comporta como una viga embebida en el suelo, se verificó que la reacción del suelo obtenida por el método de integración fuera consistente con la ecuación de la viga. Con respecto a los diagramas de fuerza cortante y momento flector en el pilote se verificaron las siguientes características:

- Para el pilote cargado con cabezal libre, la carga aplicada en el cabezal debe corresponder con el cortante máximo en ese punto

- El diagrama de cortante es cero donde el diagrama de momento toma un valor máximo

Las cargas en el pilote cargado corresponden a la carga en el cabezal y la reacción del suelo a profundidad, las cuales se evalúan por unidad de longitud del pilote. En la viga se verificó que los diagramas de cortante y momento cerraran. Se verificó la relación que existe entre la deflexión, el momento flector, la fuerza cortante y el diagrama de carga para una viga, las cuales se expresan a través de la ecuación de la viga como se muestra en la Figura 3.2.

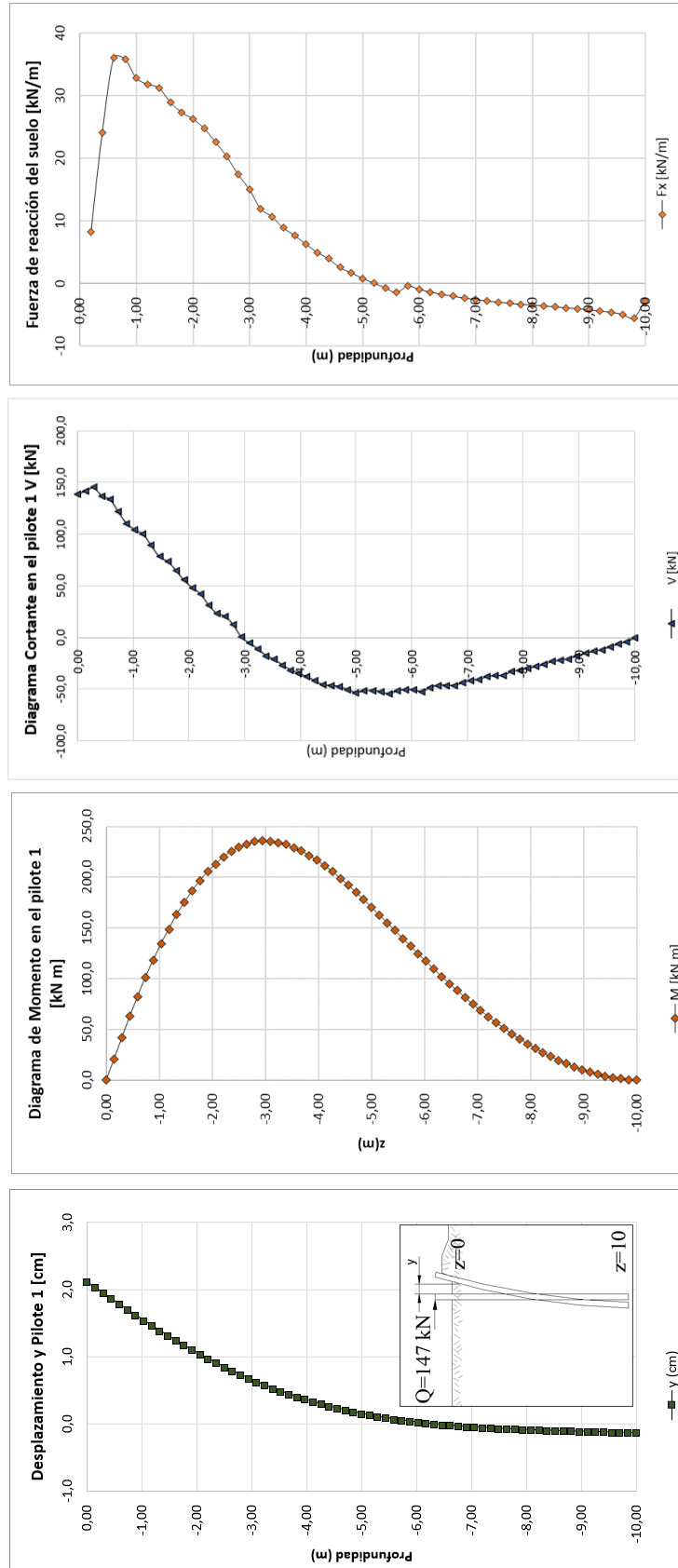
Figura 3.2: Ecuación de la viga y diagramas de fuerza cortante, momento flector y reacción

Deflexión
y

Momento Flector
 $EI \frac{d^2 y}{dz^2}$

Fuerza Cortante
 $EI \frac{d^3 y}{dz^3}$

Reacción del suelo
 $EI \frac{d^4 y}{dz^4}$



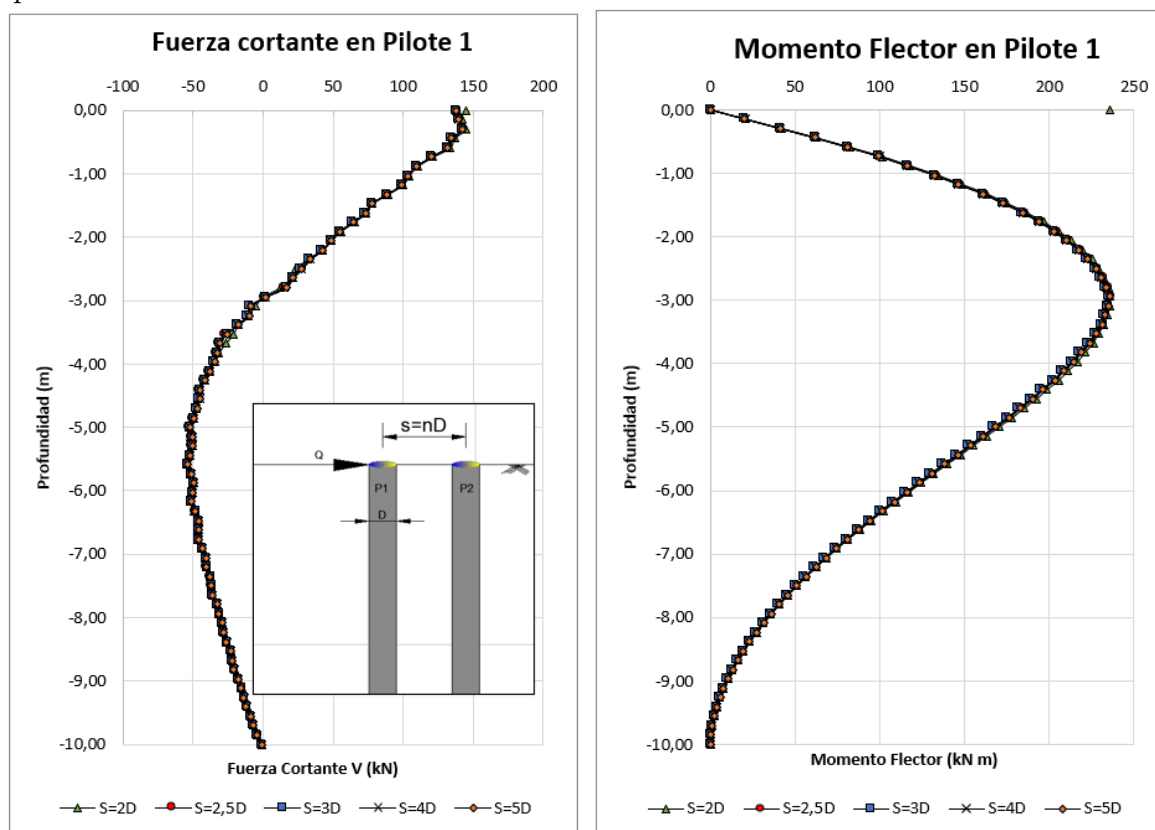
*Obtenida por integración

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Efecto de la separación entre pilotes

Se ensamblaron modelos para simular grupos de dos pilotes variando la separación centro a centro entre pilotes, se corrieron modelos con grupos de dos pilotes espaciados a distancias $S= 2D, 2.5D, 3D, 4D$ y $5D$, donde D es el diámetro de los pilotes y tanto el pilote cargado (pilote 1) como el pilote vecino (pilote 2) se encuentran alineados con la línea de acción de carga. En los modelos el pilote 1 corresponde al pilote cargado y el pilote 2 corresponde al pilote vecino. La Figura 3.3 muestra los diagramas de fuerza cortante y momento flector a lo largo del pilote 1 para una carga aplicada en el cabezal de 147 kN, como se observa, los resultados no muestran cambios en los diagramas del pilote 1 para las diferentes separaciones del pilote vecino.

Figura 3.3: Diagramas de cortante y momento flector en el Pilote 1, modelos con diferente separación Centro a Centro

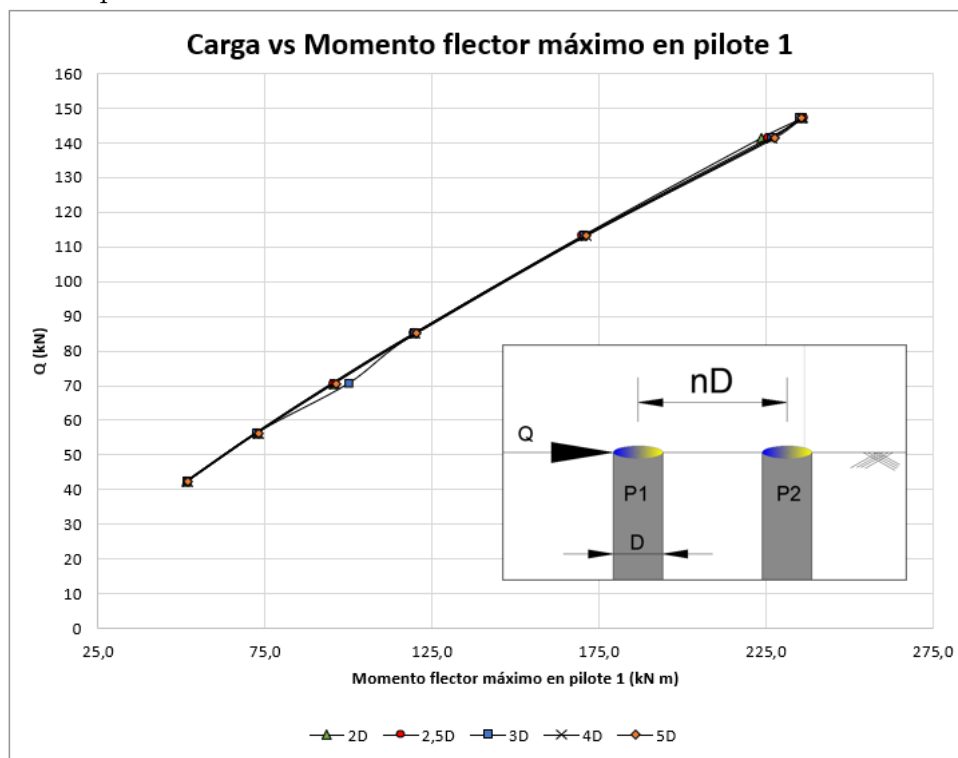


Fuente: Elaboración propia.

La relación que se obtuvo entre la magnitud de la carga aplicada y el momento flector máximo desarrollado en el pilote 1 es marcadamente lineal, esta misma tendencia se obtuvo en los experimentos en grupos de pilotes con carga lateral estática reportados en Matlock et al. (1980).

Tal y como se observa en la Figura 3.3, en el pilote 1 se desarrolla el mismo valor de momento flector máximo en todos los modelos e indistintamente de la separación y de la presencia del pilote vecino.

Figura 3.4: Carga contra momento flector máximo desarrollado en el pilote 1, modelos con diferente separación Centro a Centro



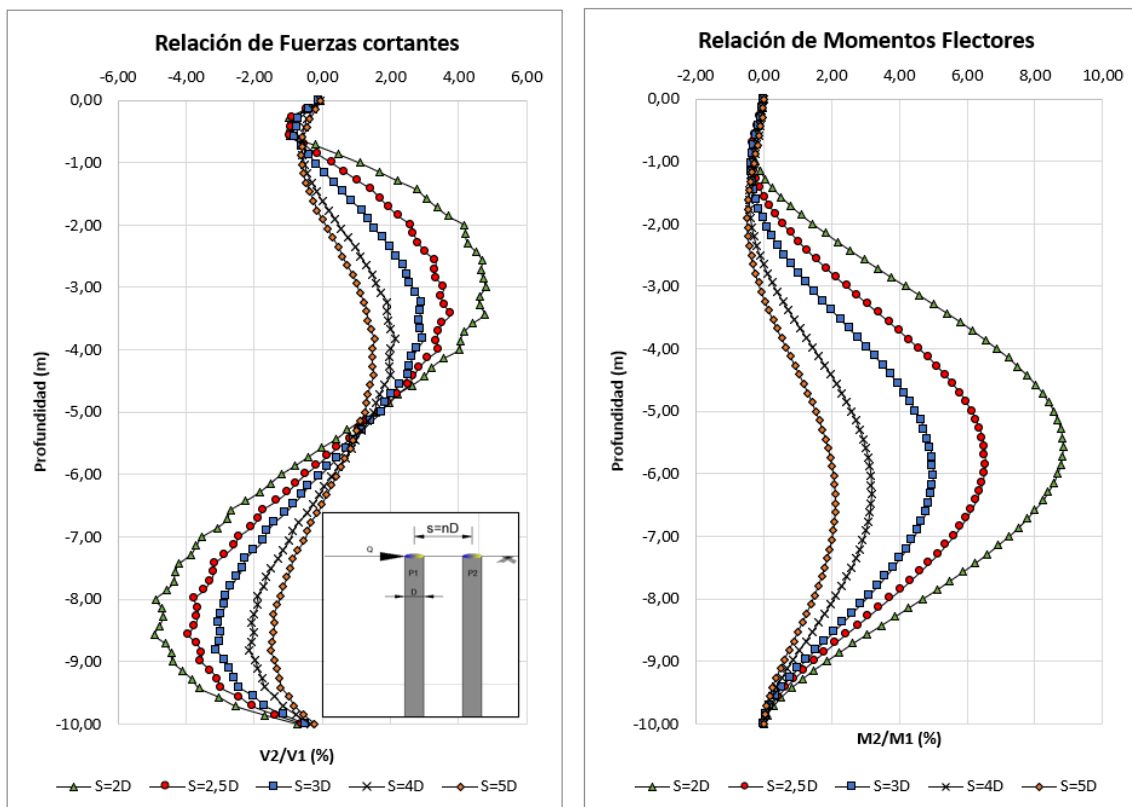
Como se observa en la Figura 3.3 en el pilote 1 se desarrolló una fuerza cortante máxima de 147 kN y el valor del momento máximo desarrollado fue de 235 kNm, la Figura 3.5 muestra los diagramas de cortante y momento flector a lo largo del pilote 2 obtenidos de las cinco variaciones del modelo; en las gráficas para el pilote 2, los valores de fuerza cortante y momento flector se graficaron como porcentaje de los valores máximos obtenidos en el pilote 1.

Los resultados muestran que a medida que el pilote 2 se localiza más lejos del pilote 1, se desarrollan fuerzas cortantes y momentos flectores menores, por ejemplo, para una separación de $5D$, el momento máximo desarrollado en el pilote 2 es aproximadamente el 2% del momento máximo que se desarrolla en el pilote 1, la forma como decrece la magnitud del momento máximo en el pilote 2 con respecto al valor del momento máximo en el pilote 1, para todas las etapas de carga, se muestra en la Figura 3.6.

De la Figura 3.6 se observa que, para los niveles de carga aplicados, la relación de momentos flectores máximos M_{p2}/M_{p1} con la separación es inversamente proporcional y de carácter lineal, para la recta mostrada en la figura se obtuvo una pendiente de -3 y punto de corte de 15.

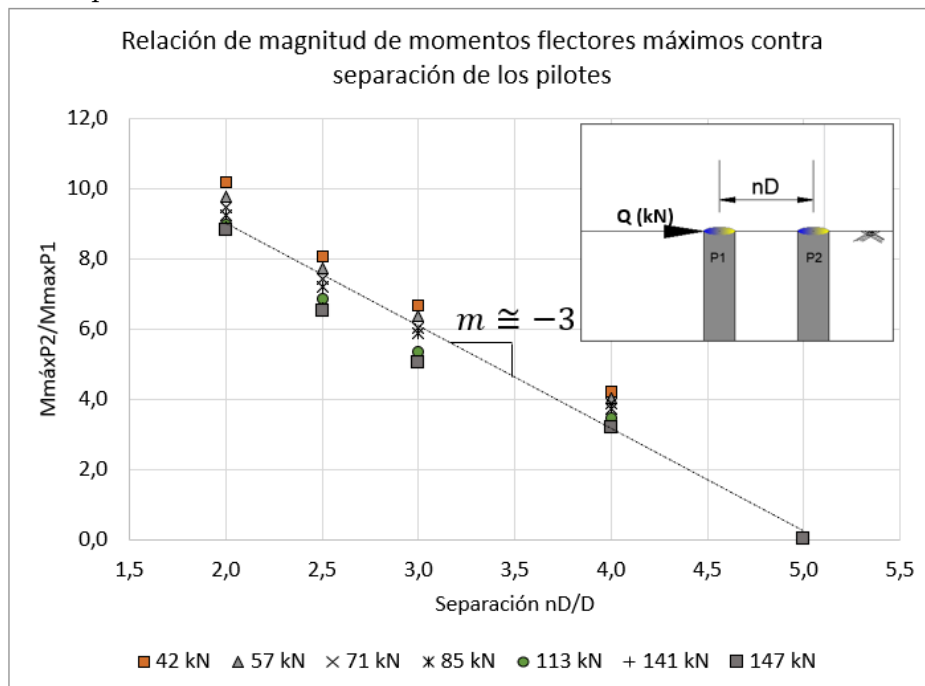
En el pilote 1 el momento máximo se desarrolla a 3 m de profundidad, en cambio, en la Figura 3.5 se observa que, el momento flector máximo en el pilote 2 se desarrolla a una profundidad mayor que en el pilote 1. Para el caso de los modelos analizados, en el pilote 2 el momento flector máximo se desarrolló a profundidades cada vez mayores conforme se aumentó la distancia entre ejes. De forma cuantitativa, para una separación de $2D$, la profundidad del momento máximo en el pilote 2 ocurre 2.6 metros más abajo que en el pilote 1.

Figura 3.5: Relación de fuerzas cortantes y momentos flectores en Pilotes, modelos con diferente separación Centro a Centro



* Los valores de fuerza cortante y momento flector se graficaron como porcentaje de los valores máximos obtenidos en el pilote 1.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.6: Relación de magnitud de momentos flectores máximos contra separación normalizada de los pilotes

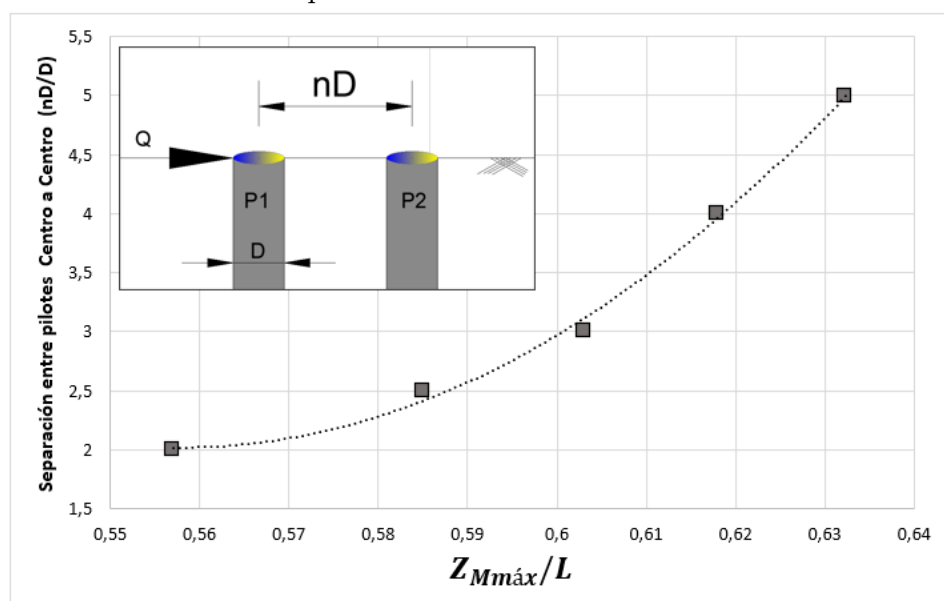


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.7 se muestra la relación entre la distancia entre pilotes y la profundidad a la cual se desarrolla el momento flector máximo Z_{Mmax} dividido entre la longitud de los pilotes, es decir Z_{Mmax}/L (adimensional) en el eje de las abscisas. Como se observa, a mayor distancia entre los pilotes, mayor es la profundidad a la que se desarrolla el momento flector máximo en el pilote vecino, la relación entre las variables mostradas en la Figura 3.7 puede ajustarse a una función polinómica de grado 2, lo que significa que a distancias entre ejes de pilotes distintas a las presentadas en la gráfica de la Figura 3.7, se debe interpolar con una función de grado 2 para encontrar la profundidad a la cual se desarrolla el momento flector máximo en el pilote 2. Información relevante en el diseño del refuerzo estructural.

En Brown et al.(1988), se muestran los resultados de experimentos sobre grupos de pilotes en arenas y ante carga lateral, los autores encontraron que los momentos flectores que desarrolla el pilote delantero son iguales a los que desarrolla un pilote individual bajo la misma carga tal y como se muestra en la Figura 3.3, también hallaron que el momento máximo de los pilotes vecinos se desarrolla a profundidades mayores tal y como se obtuvo en los modelos y como se evidencia en la Figura 3.5.

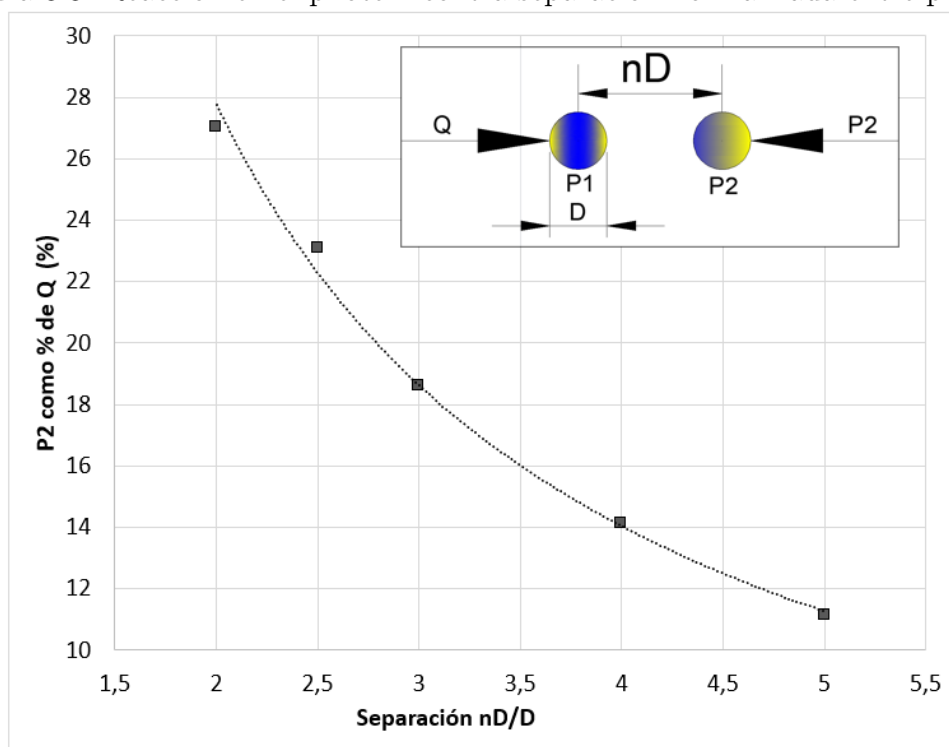
Figura 3.7: Separación normalizada entre pilotes contra la profundidad normalizada del momento flector máximo en el pilote 2



* Z_{Mmax}/L es la profundidad del momento flector máximo del pilote 2, L es la longitud de los pilotes.
Fuente: Elaboración propia.

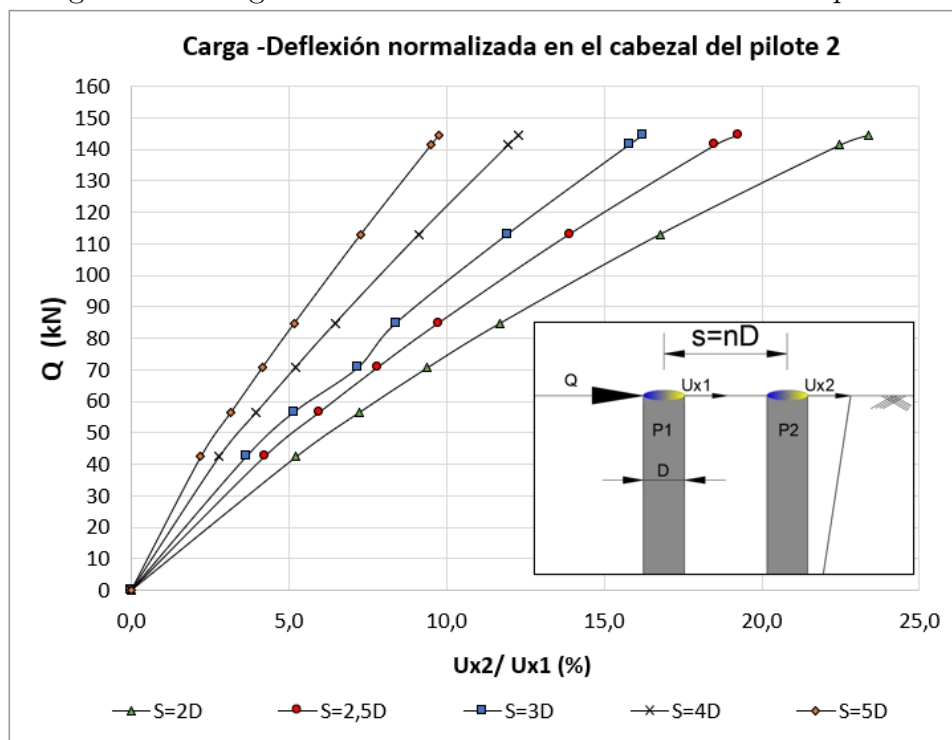
Con el método de integración, se estimó la fuerza de reacción en el suelo circundante al pilote 2 y esta fuerza de reacción se expresó como porcentaje de la carga aplicada en el cabezal del pilote 1. La Figura 3.8 muestra que, para una separación entre pilotes de 5 veces el diámetro, la fuerza de reacción en el suelo que circunda el pilote 2 es en promedio del 11 % de la carga aplicada en el cabezal del pilote 1. Con lo anterior, se puede decir que, para separaciones mayores a $5D$, en pilotes con cabezal libre, la influencia sobre el pilote 2 es tan pequeña que se puede considerar insignificante en el diseño. En la misma gráfica se observa que para separaciones de 2, 2,5, 3 y 4 veces el diámetro la fuerza de reacción en el suelo que circunda el pilote 2 es del 27 %- 23 %- 19 % y 14 % de la carga aplicada respectivamente.

Figura 3.8: Reacción en el pilote 2 contra separación normalizada entre pilotes



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.9: Carga deflexión normalizada en el cabezal del pilote 2

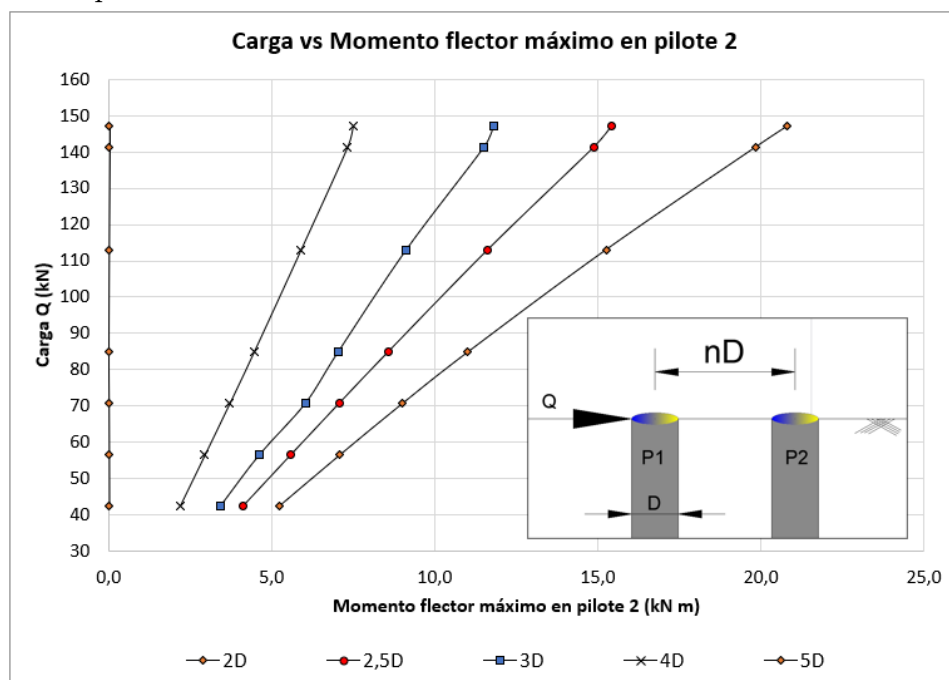


* En el eje de las abscisas se grafica el desplazamiento en el cabezal del pilote 2 como porcentaje del desplazamiento en el cabezal de pilote 1
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3.9 muestra las curvas de carga-desplazamiento en el cabezal para el pilote 2, en el eje de las abscisas se grafica el desplazamiento en el cabezal del pilote 2 como porcentaje del desplazamiento en el cabezal del pilote 1 obtenidos ambos en la misma dirección de aplicación de la carga. Las curvas muestran que la relación tiende a ser de tipo no lineal y que, a mayor separación entre los pilotes y para diferentes niveles de carga, menor es el desplazamiento que alcanza el cabezal del pilote 2 cuando sobre el pilote 1 se aplica una carga Q en el cabezal. La variación es tal que para el mayor nivel de carga alcanzado de 147 kN, los desplazamientos relativos son del 9.8 %-12.3 %-16.3 %-19.3 % y 23.4 % para espaciamientos entre pilotes de 5D-4D-3D-2.5D y 2D, respectivamente.

Para cada incremento de carga se obtuvo el momento flector máximo que se desarrolló en el pilote 2, estos valores se grafican en la Figura 3.10. En este caso, como en los experimentos de Matlock et al. (1980), también se obtuvo que la relación entre la carga aplicada y el momento máximo es marcadamente lineal, para el caso del pilote 2 se obtuvo que para la separación de 5 veces el diámetro no se desarrollan momentos flectores apreciables tal y como se observa en la Figura 3.10. Para las demás separaciones entre pilotes el momento flector máximo desarrollado en el pilote 2 depende del nivel de carga que se impone al sistema. En el caso de separación entre pilotes de 2 veces el diámetro, en el segundo pilote se desarrollan momentos flectores máximos en el rango de 5 a 21 kNm. Para separación entre pilotes de 2.5 veces el diámetro, los momentos flectores máximos desarrollados alcanzan valores entre 4 y hasta 15 kNm. Para separaciones entre pilotes de 3 veces el diámetro los momentos flectores se desarrollaron entre los 3 y los 12 kNm. La amplitud del rango de valores en el que se desarrolla el momento flector máximo del segundo pilote disminuye conforme aumenta la separación de estos, para el caso de separación de 4 veces el diámetro, el rango en el que se desarrollaron los momentos flectores máximos es de 2 a 7 kNm.

Figura 3.10: Carga contra momento flector máximo desarrollado en el pilote 2, modelos con diferente separación Centro a Centro



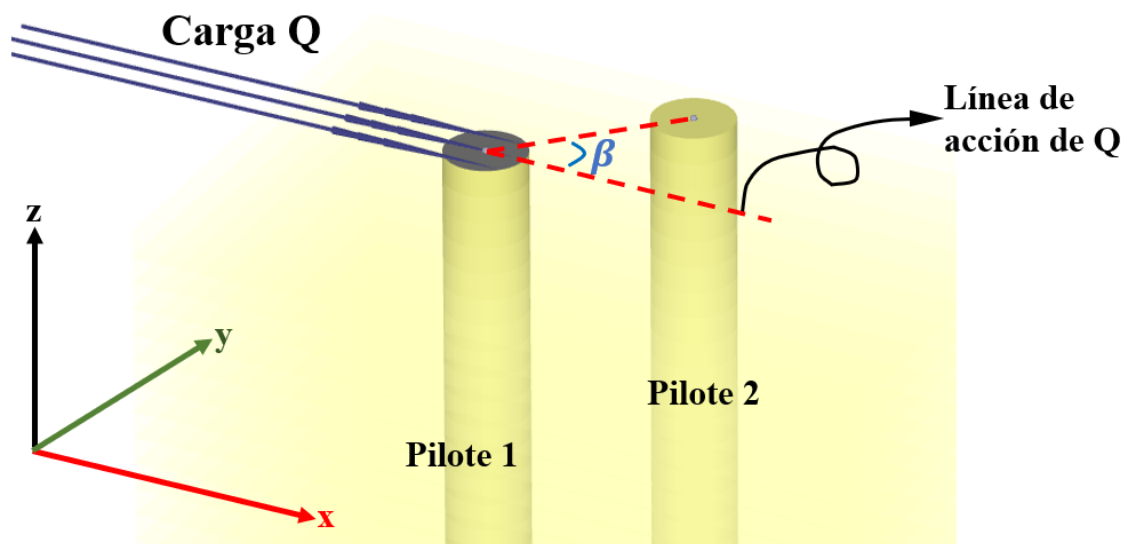
Fuente: Elaboración propia.

3.3. Efecto del Ángulo de partida β

Como se expuso en capítulos anteriores, el ángulo de partida β es el ángulo que se forma entre el vector de carga y la línea que conecta dos pilotes $i-j$ de un grupo de pilotes.

Para estudiar la incidencia que tiene el ángulo β en la influencia que ejerce un pilote sometido a carga lateral sobre los pilotes vecinos en un grupo de pilotes, se ensamblaron modelos para simular la influencia entre dos pilotes variando el ángulo β para valores de 0° , 30° , 45° , 60° y 90° y conservando la distancia entre ejes de $2.5D$ la cual en la práctica corresponde a un espaciamiento centro a centro de uso común y para el cual se obtuvo, en el capítulo anterior, que la influencia se hace suficientemente apreciable. En los modelos el pilote 1 corresponde al pilote cargado y el pilote 2 corresponde al pilote vecino, un esquema de este tipo de modelos se muestra en la Figura 3.11.

Figura 3.11: Esquema de modelos variando ángulo β

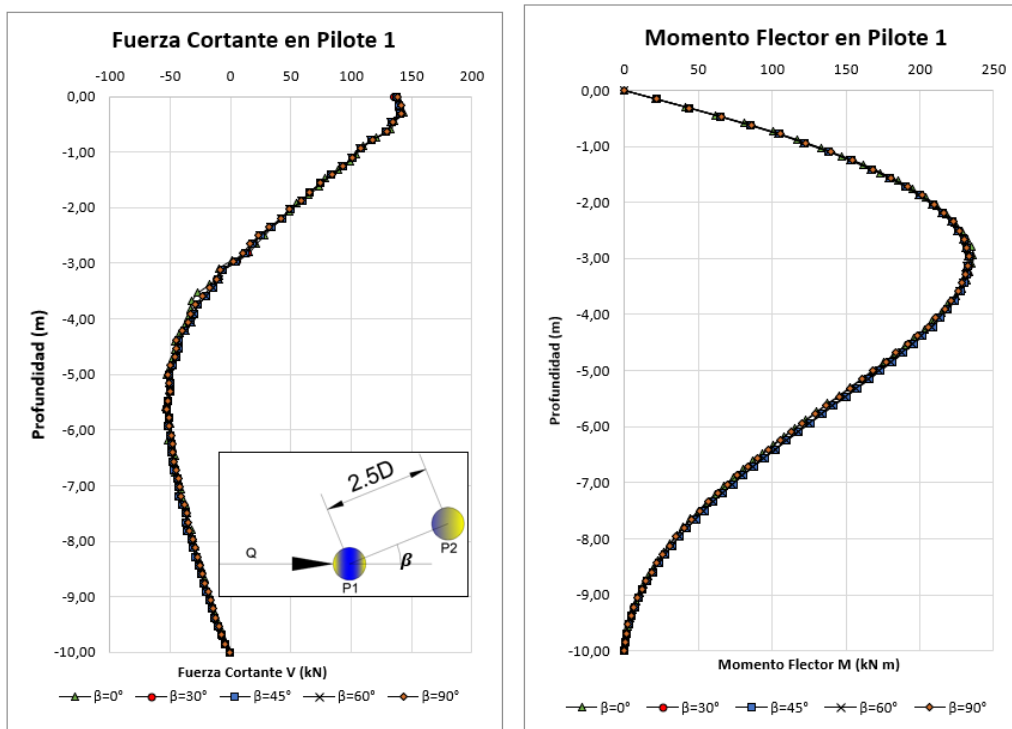


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.12 se muestran los diagramas de cortante y momento flector que se desarrollan a lo largo del pilote 1 los valores corresponden a una carga en el cabezal de 147 kN. Se observa que no se identifican cambios apreciables en los valores de fuerza cortante y momento flector para diferentes posiciones del pilote vecino.

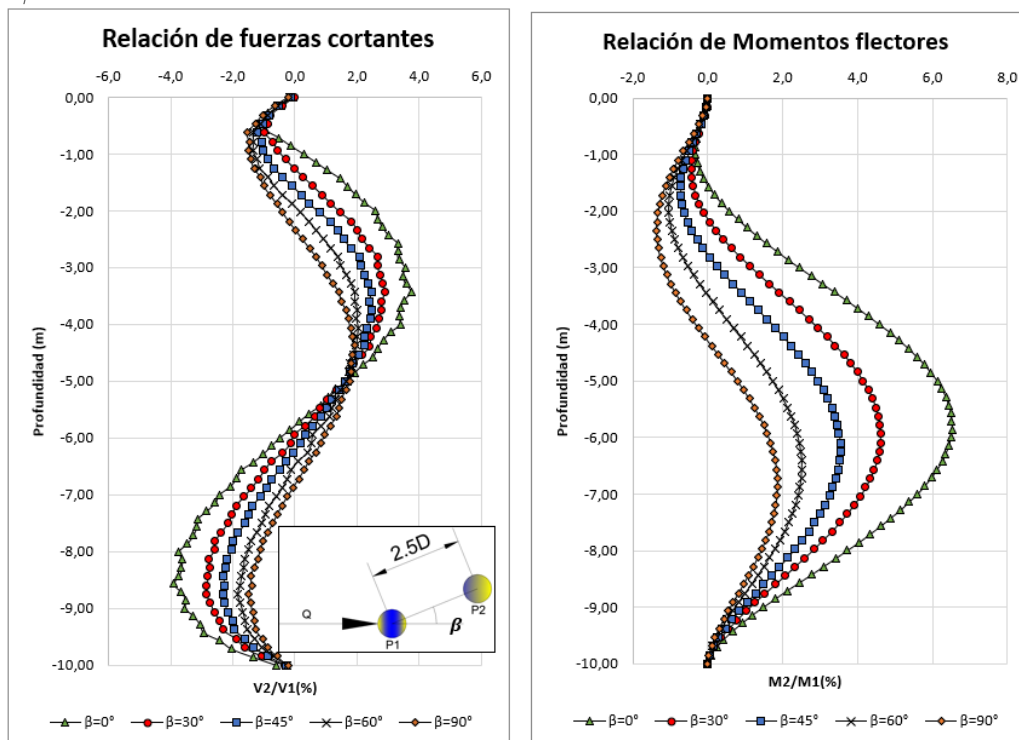
En la Figura 3.12 se observa que el valor de la fuerza cortante máxima obtenida en el pilote 1 fue de 147 kN y el momento flector máximo obtenido fue de 234 kNm. La Figura 3.13 muestra los diagramas de cortante y momento flector a lo largo del pilote 2 obtenidos de los cinco modelos donde se varió el ángulo de partida. En las gráficas para el pilote 2, los valores de fuerza cortante y momento flector se graficaron como porcentaje de los valores máximos obtenidos en el pilote 1. Se observa que a medida que el pilote 2 se localiza en un ángulo de partida mayor, se desarrollan fuerzas cortantes y momentos flectores menores en comparación con los que se obtienen para el pilote 1, aun cuando se mantiene la separación centro a centro entre pilotes.

Figura 3.12: Diagramas de cortante y momento flector en el Pilote 1, modelos con diferente ángulo β



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.13: Diagramas de cortante y momento flector en pilotes, modelos con diferente ángulo β



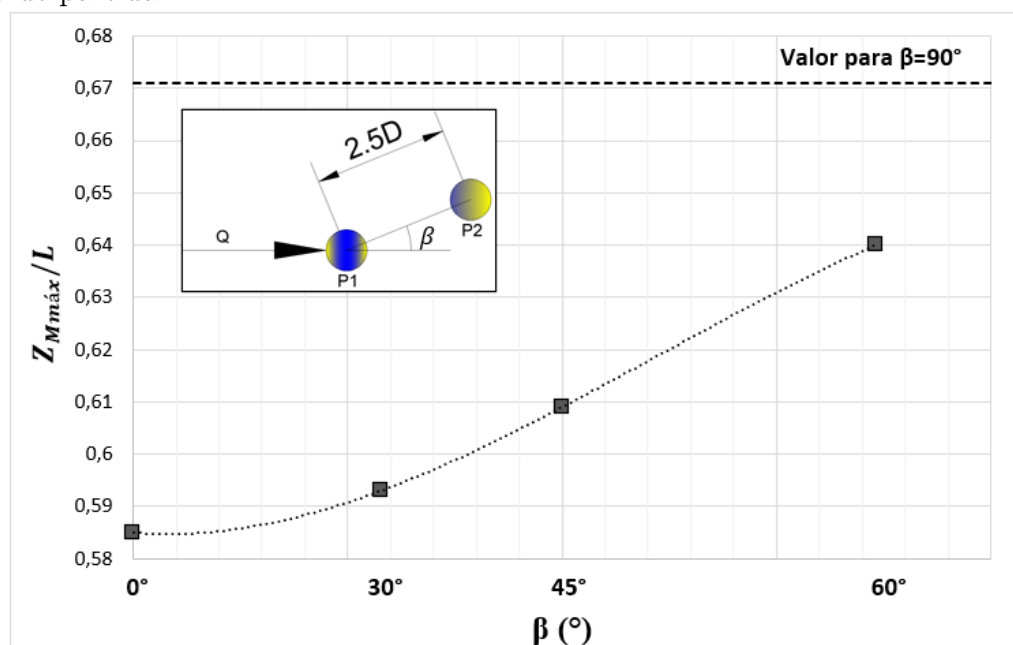
*Los valores de fuerza cortante y momento flector se graficaron como porcentaje de los valores máximos obtenidos en el pilote 1
Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 3.13 se observa que cuando el pilote 2 se localiza a $2.5D$ y a 90° del pilote 1, en el pilote 2 se desarrolla tan solo el 2% del momento flector máximo del pilote 1, lo que se interpreta como interacción insignificante o nula, por esta razón cuando se trabaja con factores de interacción para modificar curvas $p-y$ no se considera interacción entre pilotes de la misma fila.

Al igual que en los modelos donde se varió la distancia entre pilotes, los resultados muestran que el momento flector máximo en el pilote 2 se desarrolla a una profundidad mayor que la del pilote 1. Para las condiciones de carga impuestas, el momento flector máximo en el pilote 1 tiene lugar a 3 m de profundidad, en cambio, como se evidencia en la Figura 3.13, en el segundo pilote el momento flector se desarrolla a mayores profundidades conforme crece el ángulo de partida, este efecto se muestra en la Figura 3.14.

La curva de la Figura 3.14 muestra en el eje de las ordenadas la profundidad del momento flector máximo del pilote 2, Z_{Mmax} normalizada a la longitud de los pilotes, es decir Z_{Mmax}/L , por otro lado, en el eje de las abscisas se graficó el ángulo de partida, de la curva se puede decir que la relación entre estas variables se puede aproximar a una función con arcotangente de β . Lo que significa que, si se quiere conocer el valor de la profundidad a la cual ocurre el momento flector máximo en el segundo pilote, conociendo el ángulo de partida, se debe interpolar utilizando una función de tipo arcotangente de β , esta información es relevante en el diseño del refuerzo estructural.

Figura 3.14: Profundidad normalizada del momento flector máximo en el pilote 2 contra ángulo de partida

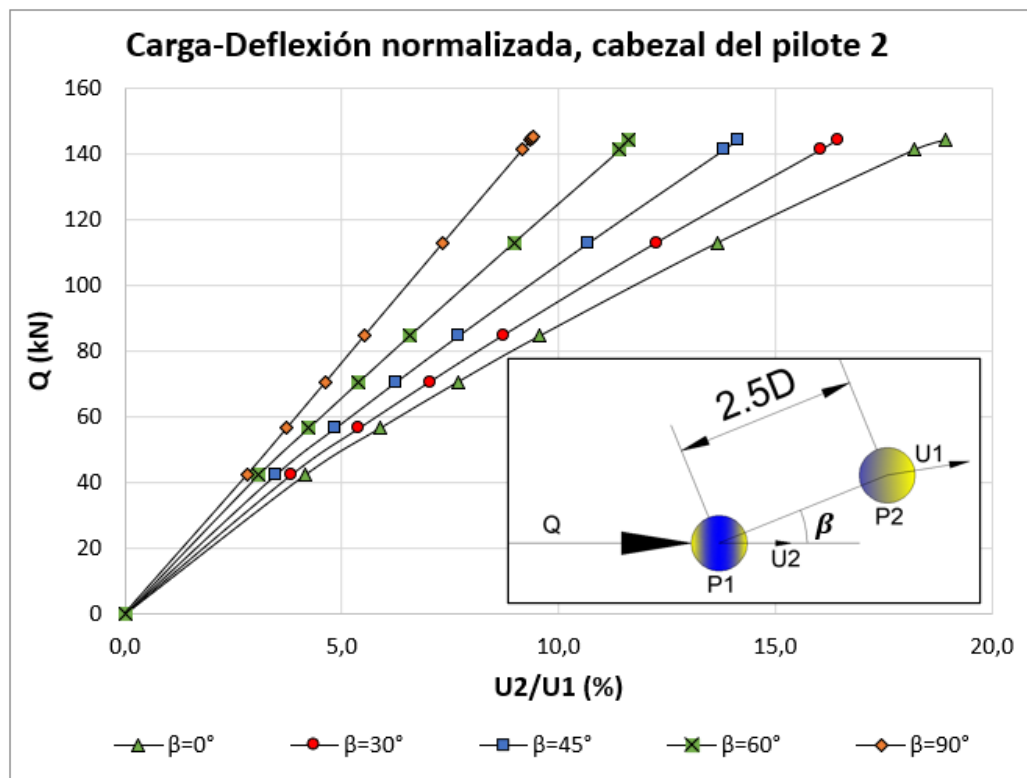


* Z_{Mmax} es la profundidad del momento flector máximo del pilote 2, L longitud de los pilotes.
Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo la curva de carga en el pilote 1 contra desplazamiento en el cabezal del pilote 2 para diferentes ángulos de partida, los valores del desplazamiento en el pilote 2 se dividieron entre los valores de desplazamiento obtenidos en el pilote 1. En la Figura 3.15 se

observa que a medida que el pilote 2 se localiza a un ángulo de partida mayor, se desarrollan menores desplazamientos en el pilote y la relación carga desplazamiento tiende a ser más lineal conforme aumenta el ángulo β . El comportamiento es tal que, para una misma separación centro a centro, a mayor ángulo de partida, menor es el desplazamiento que alcanza el cabezal del pilote 2.

Figura 3.15: Carga desplazamiento en el cabezal del pilote 2, modelos con diferente ángulo β



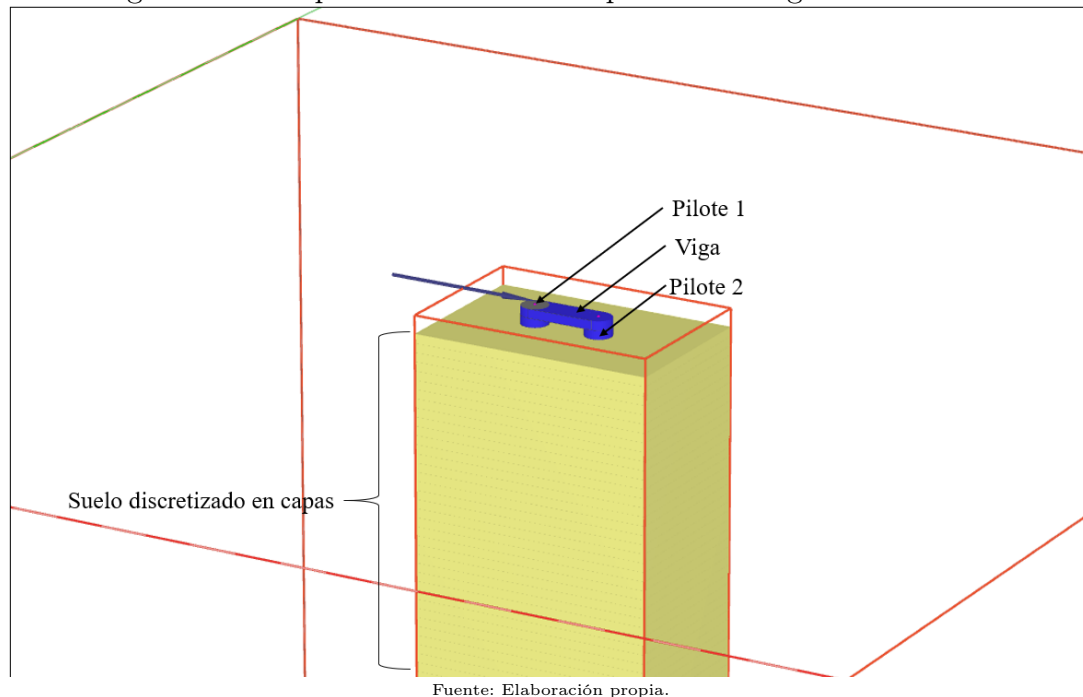
*En las abscisas los valores del desplazamiento del pilote 2 se dividieron entre los valores de desplazamiento obtenidos en el pilote 1.
Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 3.15 se observa que para una separación de $2.5D$ y un ángulo de partida de 90° , en la etapa de carga de 140 kN , el pilote 2 se desplazó el 9% de lo que se desplazó el pilote 1, esto indica que, en pilotes que pertenecen a la misma fila dentro de un grupo la influencia puede considerarse insignificante en el diseño.

3.4. Efecto de la viga cabezal

Se ensamblaron modelos de grupos de dos pilotes unidos por el cabezal a través de una viga, el esquema del modelo se muestra en la Figura 3.16. La viga se modeló con las mismas propiedades del material de los pilotes. Se obtuvieron los diagramas de fuerza cortante y momento flector en los dos pilotes del grupo, en los resultados obtenidos se observan marcadas diferencias con respecto al grupo de pilotes con cabezal libre.

Figura 3.16: Esquema del modelo de pilotes con viga en el cabezal



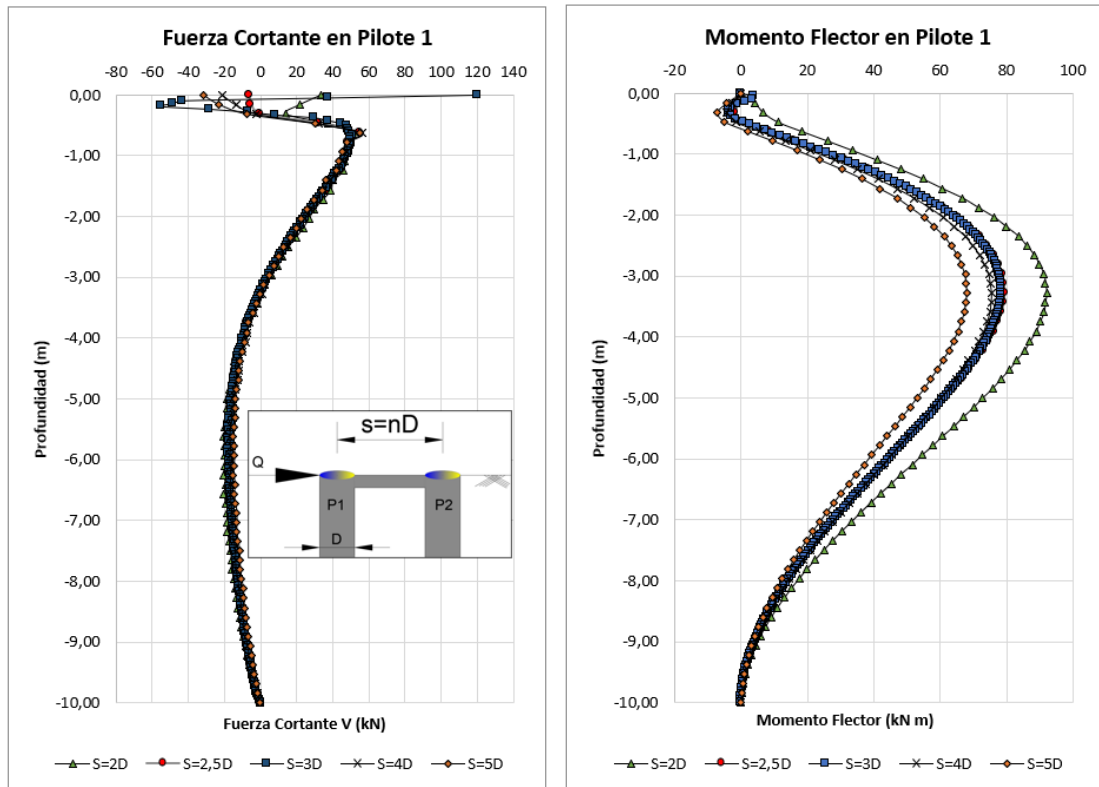
En los modelos de pilotes con cabezal restringido se varió la separación centro a centro entre pilotes, la carga se aplica sobre el pilote 1 como se muestra en la Figura 3.16. En la Figura 3.17 se muestra el diagrama de fuerza cortante y momento flector para el pilote 1, obtenidos para una carga aplicada de 147 kN.

Como se observa en la Figura 3.17, como consecuencia de la existencia de la viga cabezal, en la cabeza del pilote se desarrollan fuerzas cortantes diferentes a la carga aplicada y momentos flectores no nulos. A diferencia de los modelos con cabezal libre, en estos modelos donde existe la viga cabezal, el momento flector máximo desarrollado en el pilote aumenta conforme disminuye la separación entre pilotes del grupo, la diferencia es más apreciable al comparar entre los modelos cuya separación es $2D$ y $5D$. En los diagramas de cortante las diferencias se obtienen en el cabezal de los pilotes, donde se unen a través de la viga, allí el cortante es diferente en cada modelo con diferente separación centro a centro respecto del segundo pilote.

Otra diferencia importante entre los modelos con cabezal libre y los modelos con viga tiene que ver con la carga máxima aplicada al sistema. En todos los modelos el valor de la carga aplicada se aumentó hasta que el sistema alcanzara deformaciones excesivas, lo que se interpreta como una condición de falla. En los modelos de pilotes con cabezal libre, la carga máxima aplicada está condicionada por el pilote 1, en contraste, en los modelos con viga en el cabezal, el sistema parece soportar más carga cuanto más unidos están los pilotes, esto se puede ver en la curva de la Figura 3.18.

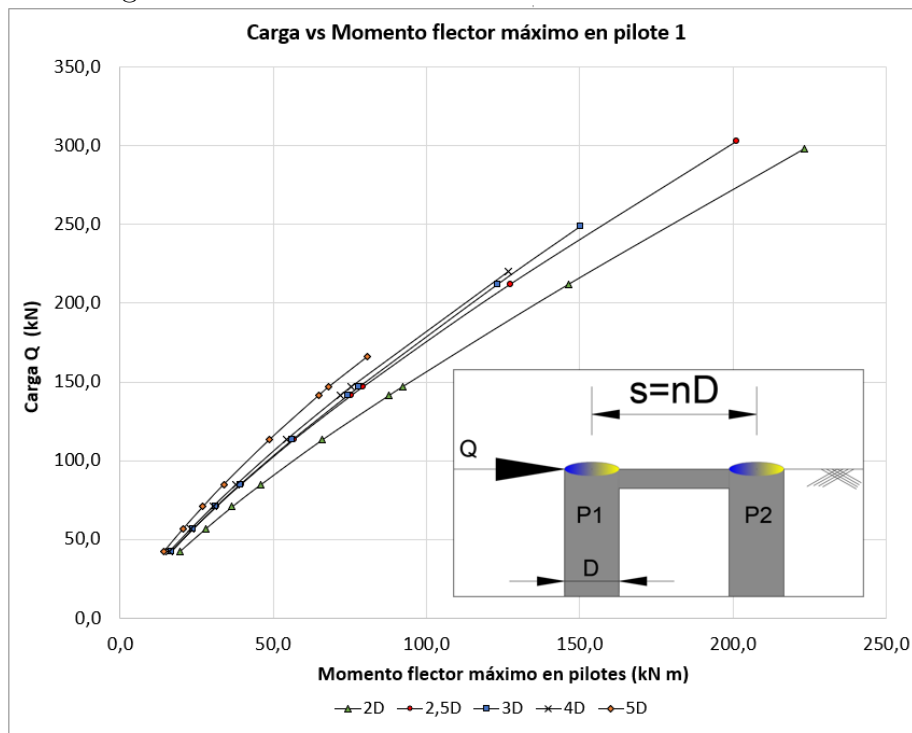
En la Figura 3.18 se muestra que la relación entre la magnitud de la carga aplicada y el momento flector máximo desarrollado en el pilote 1 no es lineal, también se evidencia que, a mayor separación entre los pilotes, menor es la carga que se puede imponer al sistema.

Figura 3.17: Diagramas de cortante y momento flector en el Pilote 1, modelos con viga cabezal



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.18: Carga contra momento flector máximo desarrollado en el pilote 1, modelos con cabezal restringido



Fuente: Elaboración propia.

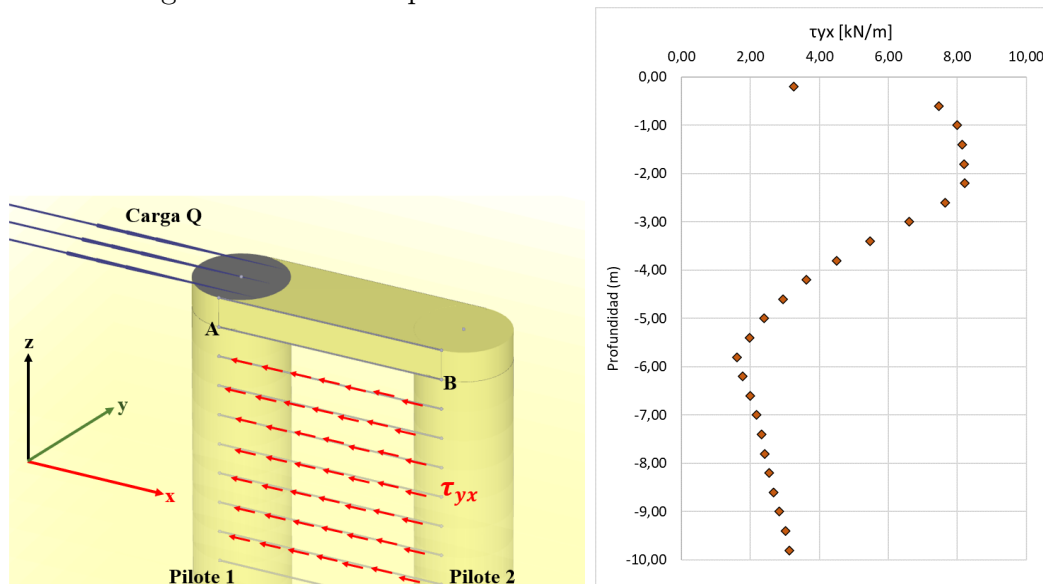
Con respecto a los grupos de pilotes unidos con una viga en el cabezal, es importante mencionar que se observó que el pilote 2 alcanza desplazamientos laterales aproximadamente iguales a los del pilote 1, al desplazarse lateralmente como grupo, en la porción de suelo que se localiza en medio de los dos pilotes se desarrollan esfuerzos cortantes que contribuyen de forma importante a la reacción del suelo ante el empuje lateral del sistema. Para observar este efecto se extrajo la información de esfuerzo cortante en los planos verticales que conforman el perímetro del grupo de pilotes, plano AB_z en la Figura 3.19. Se empleó el método de integración para estimar la magnitud de la fuerza cortante que se desarrolla en las caras AB_z y se encontró que esta fuerza contribuye en la reacción del sistema de cimentación ante carga lateral.

Como se muestra en la Figura 3.19, la magnitud de la fuerza cortante τ_{xy} es mayor cerca al cabezal de los pilotes y decae con la profundidad hasta el punto de giro de los pilotes y desde allí vuelve a aumentar. Como se expuso en el Capítulo 1.2.4 respecto a la falla en grupos de pilotes, es posible obtener el espaciamiento mínimo entre pilotes para el cual ocurre la falla en bloque mostrada en la Figura 1.8, mediante la expresión:

$$s/D < \frac{3K_p}{2K \tan \phi}$$

Suponiendo que $K=K_p$, en el caso de análisis del presente estudio, la falla en bloque ocurriría para espaciamientos $s/D \approx 2.6$, bajo estas circunstancias una parte importante de la resistencia del suelo se moviliza en los planos verticales perimetrales al grupo.

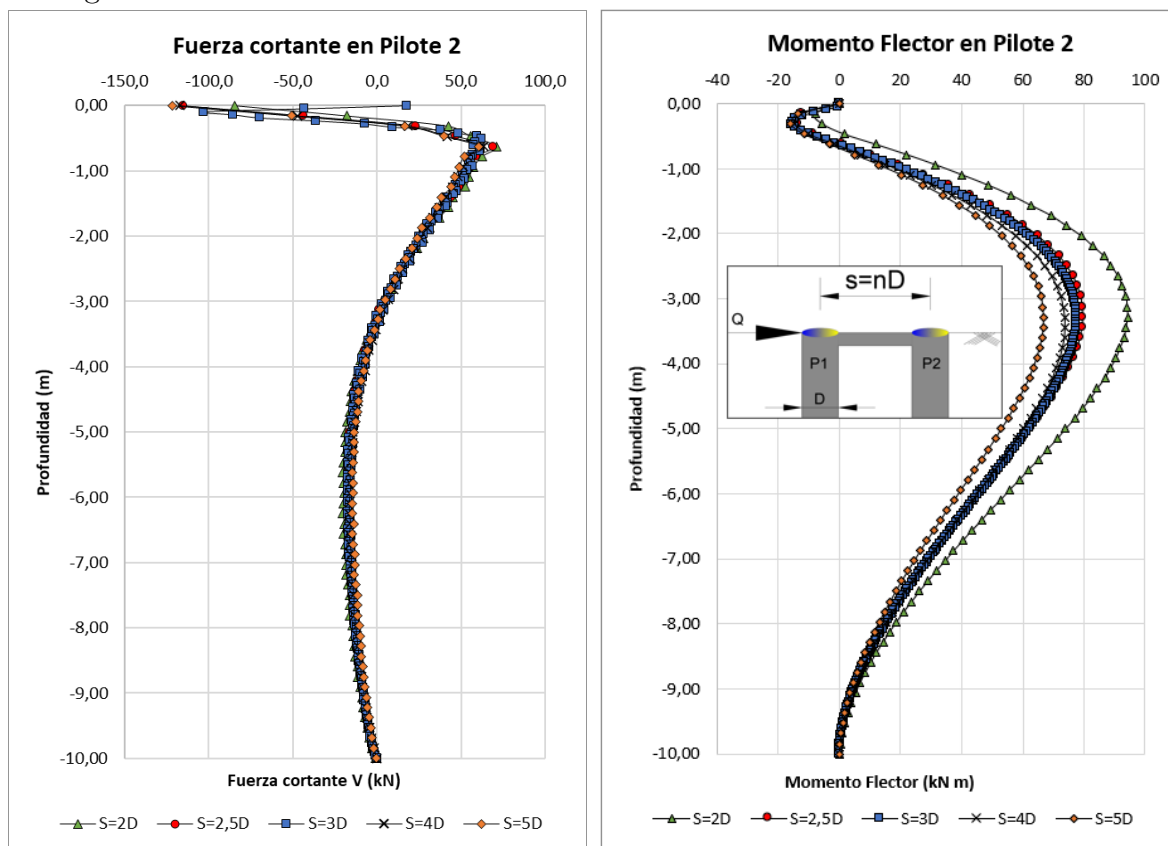
Figura 3.19: Planos para evaluación de esfuerzos cortantes



Fuente: Elaboración propia.

Los diagramas de momento flector y de fuerza cortante del pilote 2 se muestran en la Figura 3.20, en este caso las tendencias son las mismas que se desarrollan en el pilote 1 y a diferencia de los grupos de pilotes con cabezal libre, se obtuvo que el momento flector máximo se desarrolla a la misma profundidad del pilote 1 indistintamente de la separación centro a centro de los dos pilotes. Es necesario comentar que la viga cabezal se modeló con las mismas propiedades del material de los pilotes.

Figura 3.20: Diagramas de cortante y momento flector en el Pilote 2, modelos con cabezal restringido



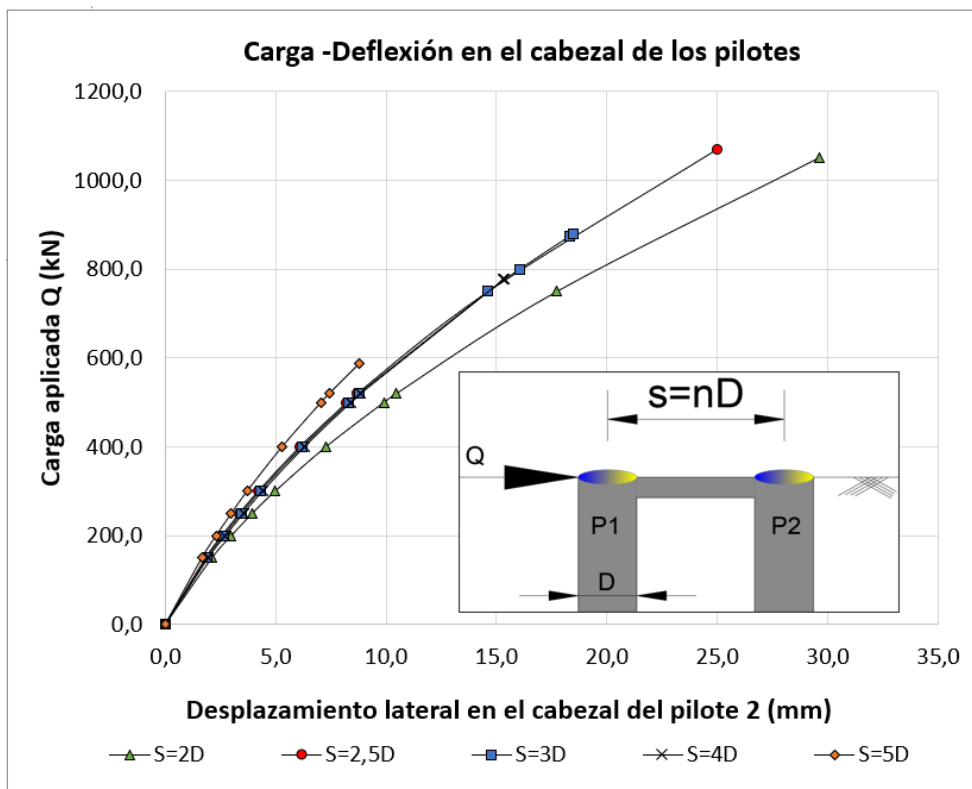
Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 3.17 y en la Figura 3.20 la magnitud del momento flector máximo es del mismo orden de magnitud en los dos pilotes, es decir que, en el grupo de pilotes con la viga en el cabezal se logra una transferencia de cargas considerable desde el pilote cargado es decir el pilote 1 hacia el pilote vecino es decir el pilote 2.

Para una misma separación centro a centro, se obtuvo que las diferencias encontradas entre la deflexión del cabezal del pilote 2 respecto a las del pilote 1, son inferiores al 1%, lo que indica que, en el caso de pilotes unidos por una viga en el cabezal la deflexión lateral de los dos pilotes es, términos prácticos, la misma, no obstante, es posible que los resultados cambien si se asignan propiedades de resistencia y rigidez diferentes en la viga cabezal.

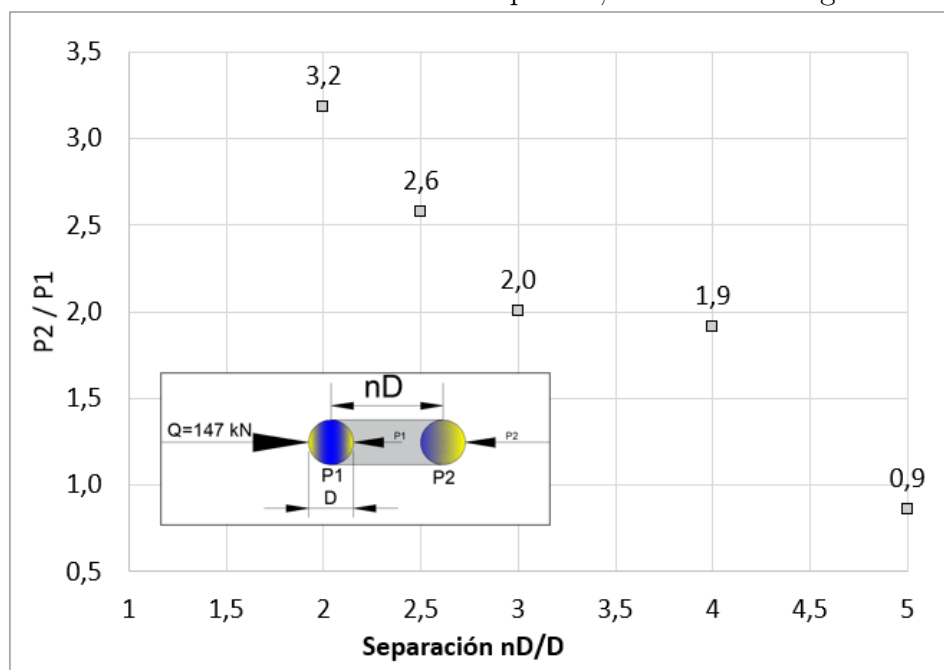
En la Figura 3.21 se muestran las gráficas de carga contra desplazamiento en el cabezal del pilote 2 para las diferentes separaciones centro a centro estudiadas. Se observa que a medida que los pilotes están más separados entre sí, menos carga se puede imponer al sistema y consistentemente la deflexión lateral es menor. En las modelaciones con elementos numéricos se crearon etapas sucesivas en las que se aumentó la carga hasta un nivel donde las deflexiones en el cabezal aumentan sin incremento en los esfuerzos, esto se interpreta como la carga de falla, se encontró que, en los modelos con cabezal y separaciones pequeñas, como $2D$ o $2.5D$, entre los pilotes, la carga aplicada es de hasta 6 veces la que se puede imponer al sistema equivalente de pilotes con cabezal libre.

Figura 3.21: Carga desplazamiento en el cabezal del pilote 2, modelos con viga en el cabezal



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.22: Relación de reacciones de los pilotes, modelos con viga en el cabezal

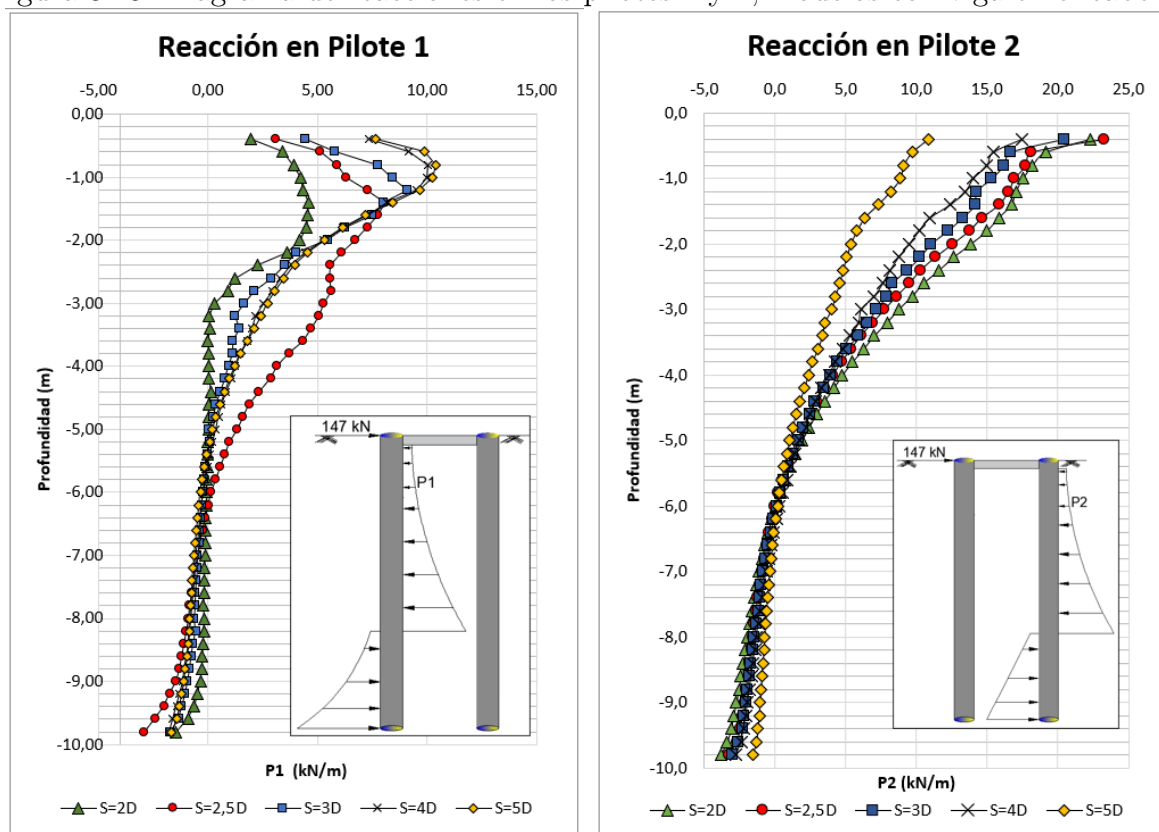


Fuente: Elaboración propia.

Se estimó la fuerza de reacción en el suelo que rodea los dos pilotes para una carga aplicada de 147 kN, en el proceso de integración solo se consideraron los esfuerzos normales (σ_{xx}) que actúan en el mismo sentido de aplicación de la carga en dirección x . Se encontró que la

fuerza de reacción en el suelo que rodea el pilote 2 es superior a la que se obtiene en el suelo que rodea al pilote 1 ya que la relación P_2/P_1 es mayor a 1 para separaciones inferiores a $5D$. En los cálculos se ignoraron las fuerzas cortantes que se pueden desarrollar en las áreas de la viga cabezal en contacto con el suelo y en las áreas de la base de los pilotes, también se ignoraron las fuerzas cortantes que desarrollan en las caras AB_z , mostradas en la Figura 3.19. Se encontró que a medida que el pilote 2 se sitúa más lejos del pilote 1 el suelo situado en el espacio entre los dos pilotes se carga más, ya que como se observa en la Figura 3.22 la relación P_2/P_1 disminuye en cuanto el pilote 2 se localiza más lejos del pilote 1, por ejemplo, para una separación de $2D$ la reacción en el suelo que rodea el pilote 2 es 3 veces la reacción en el suelo que rodea el pilote 1. Tal y como se encontró en Selby y Poulos (1984) en los experimentos descritos en el capítulo 1.4, en grupos de pilotes unidos por un cabezal, frente al pilote de la fila delantera se desarrollan mayores reacciones en el suelo.

Figura 3.23: Diagrama de reacciones en los pilotes 1 y 2, modelos con viga en el cabezal



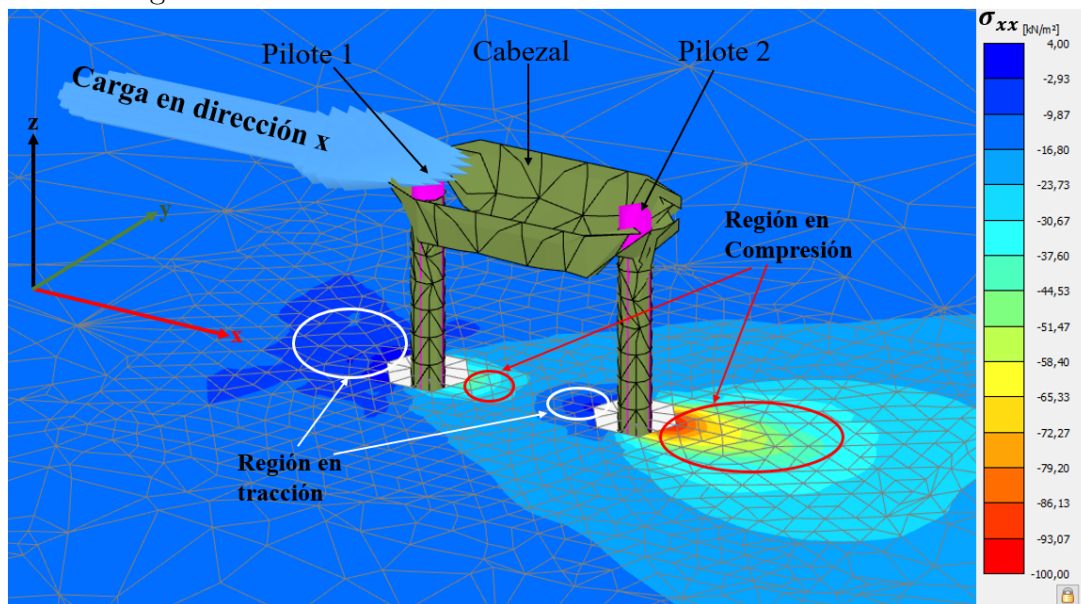
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.23 se grafica la fuerza de reacción en cada uno de los 50 puntos de integración a lo largo del fuste del pilote 1, se observa que a medida que el segundo pilote se localiza más lejos, la magnitud de la fuerza de reacción en el pilote 1 aumenta. Es decir que cuando el segundo pilote se localiza a distancias pequeñas, el sistema de cimentación tiende a comportarse como una gran zapata que involucra el perímetro del grupo de pilotes y el suelo localizado entre los pilotes. En la misma figura se muestra el mismo diagrama de reacciones obtenido para el pilote 2, se puede identificar que la situación es inversa, es decir la magnitud de la fuerza de reacción en el suelo que rodea el segundo pilote, disminuye conforme este se separa del pilote cargado.

En la Figura 3.23 se pone en evidencia que, en pilotes sometidos a carga lateral la reacción del suelo se concentra en las regiones más cercanas a la superficie, esta observación también fue realizada por Brown et al. (1988) en sus experimentos para estudiar el efecto de sombra en grupos de pilotes con carga lateral.

Como se estudió en el Capítulo 1.1, con la aplicación de la carga, cada pilote empuja el suelo delante de él y se genera una zona de incremento de esfuerzos que es particularmente intensa al frente del pilote, esta zona de influencia que se asemeja a una “sombra”, se agranda a medida que la carga lateral aumenta. La superposición de sombras que ocurre entre pilotes de diferentes filas se conoce como “Efecto de sombra”. En la Figura 3.24 se muestra un detalle de las regiones del suelo que rodean los pilotes en ella es posible identificar las “sombras” de los pilotes. Se identifica que, en una etapa de carga, en el suelo que rodea los pilotes, se pueden generar regiones en tracción y otras regiones en compresión, en la Figura 3.24 se muestran contornos del esfuerzo normal en dirección x . En PLAXIS 3D® la convención de esfuerzos es tal que los esfuerzos de compresión son de signo negativo y los esfuerzos de tracción son positivos.

Figura 3.24: Detalle de las regiones del suelo alrededor de los pilotes en etapa de carga, modelos con viga en el cabezal



Fuente: Elaboración propia.

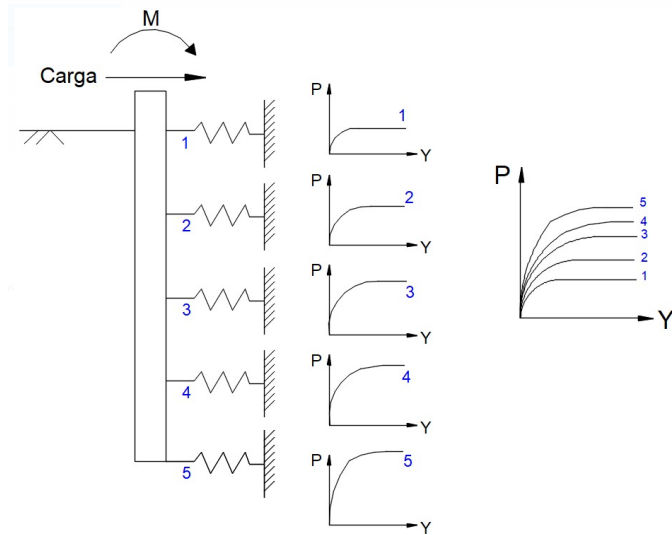
La situación que se describe en la Figura 3.24 explica el hecho de que en el suelo que rodea el pilote 1 se obtenga una reacción de magnitud inferior a la que se obtiene en el suelo que rodea el pilote 2. Para el caso de los pilotes unidos con viga cabezal, como se observa de la Figura 3.24 en la región de suelo localizada entre los dos pilotes pueden ocurrir de forma simultánea procesos de carga y descarga lateral en el suelo, contrario a lo que sucede en el caso estudiado de pilotes con cabezal libre, en el cual en el suelo localizado en la región entre los dos pilotes ocurren solo esfuerzos de compresión. Si los pilotes se construyen muy cerca, por ejemplo, a distancias centro a centro inferiores a $2D$, las regiones en compresión y en extensión lateral mostradas en la Figura 3.24 se pueden solapar y por lo tanto la fuerza de reacción del suelo que se obtiene es menor.

Se puede decir que el comportamiento de grupos de pilotes con carga lateral está fuertemente influenciado por las condiciones de restricción en el cabezal.

3.5. Curvas p-y

Como se estudió en el Capítulo 1.3.2 en las curvas $p-y$ se relaciona la reacción p del suelo ante una carga lateral con la deflexión lateral y del pilote, ambas variables obtenidas a una profundidad z determinada. El método permite reemplazar el suelo por una serie de resortes elastoplásticos como se ilustra en la Figura 3.25.

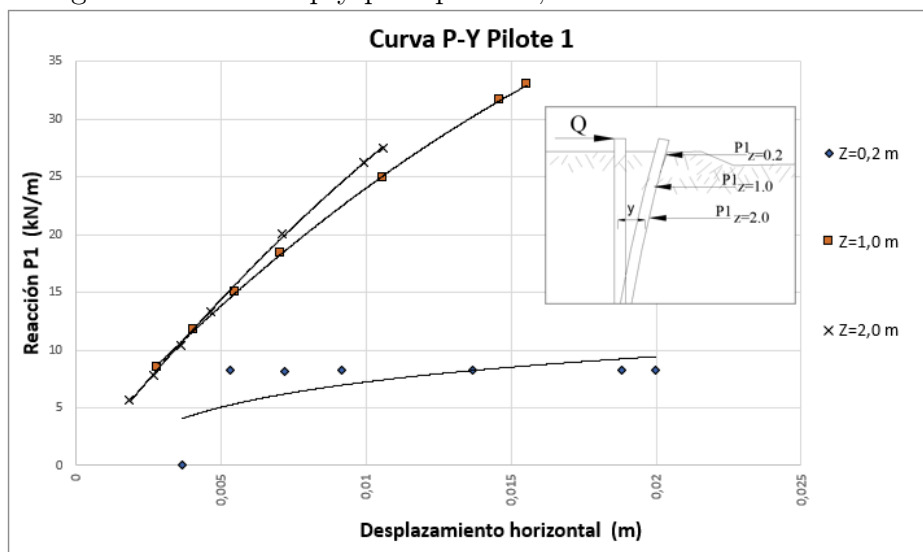
Figura 3.25: Ilustración esquemática de relaciones carga-desplazamiento a profundidad



Fuente: Elaboración propia.

Para obtener las curvas $p-y$ fue necesario calcular, para diferentes magnitudes de carga en el cabezal, la fuerza de reacción del suelo que circunda el pilote, esto se realizó a través del método de integración de esfuerzos. También se obtuvo la deflexión y del pilote para todas las profundidades en las cuales se calculó la fuerza de reacción. La Figura 3.26 muestra las curvas $p-y$ obtenidas para el pilote 1 con cabezal libre, las curvas se obtuvieron para tres profundidades medidas desde el cabezal del pilote, a saber: $z=0.2$ m, $z=1$ m y $z=2$ m.

Figura 3.26: Curva p-y para pilote 1, modelos con cabezal libre

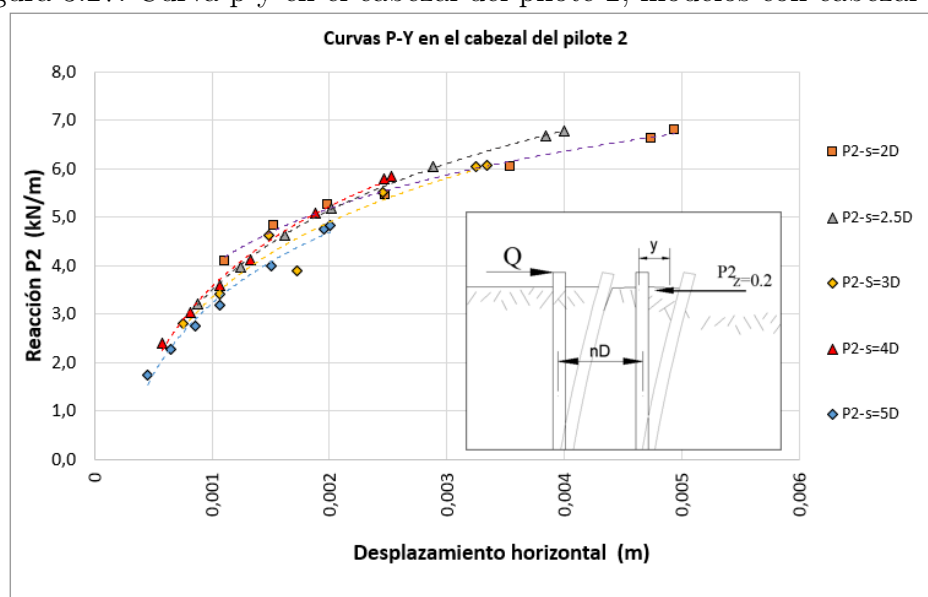


Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3.26 muestra las curvas reacción -desplazamiento o curvas $p-y$ obtenidas para tres diferentes profundidades en el pilote. Se puede identificar que a medida que se avanza en profundidad la rigidez del suelo aumenta, esto se refleja en la pendiente de las curvas $p-y$. Por ejemplo, para la curva obtenida a 0.2 m de profundidad, la pendiente de una recta secante a la curva es de 20 kN/m^2 , mientras que el valor de una recta secante que se obtiene para la curva $p-y$ obtenida a 2 m de profundidad es de 2482 kN/m^2 . Se debe considerar que a 0.2 m de profundidad el esfuerzo de confinamiento es pequeño y ante la carga lateral, la fuerza de reacción es también pequeña, es decir la respuesta del suelo ante la carga lateral, esta influenciada por el esfuerzo vertical in situ σ'_{zis} .

Se obtuvieron las curvas $p-y$ para el segundo pilote en todos los modelos sin cabezal, las curvas se muestran en la Figura 3.27. Se observa que, para los modelos sin cabezal, la relación reacción- desplazamiento en el cabezal del pilote 2 cae sobre una misma curva $p-y$ indistintamente de la separación a la cual se encuentre el pilote 2 con respecto al pilote 1. Las curvas fueron obtenidas a una profundidad de 0.2 m medida desde la superficie, en esta región cercana al cabezal se observa que el comportamiento reacción- desplazamiento lateral, es marcadamente no lineal.

Figura 3.27: Curva $p-y$ en el cabezal del pilote 2, modelos con cabezal libre



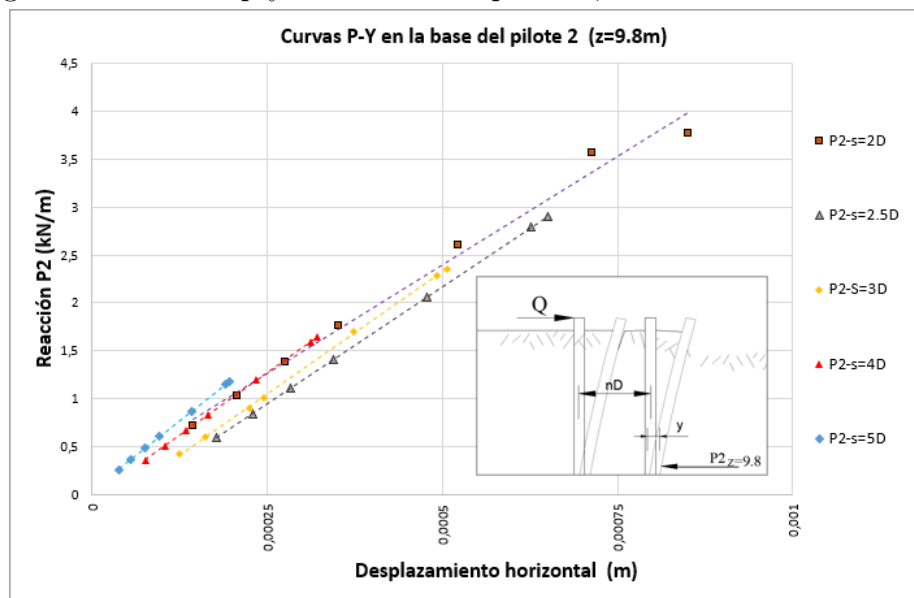
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.28 se muestran las curvas $p-y$ para el segundo pilote de todos los modelos sin cabezal, estas últimas curvas se obtuvieron a una profundidad cercana a la base del pilote, en este caso a $z=9.8 \text{ m}$. Se observa que, para los modelos sin cabezal, la relación reacción- desplazamiento en la base del pilote 2 también cae sobre una misma curva $p-y$ indistintamente de la separación a la cual se encuentre el pilote 2 con respecto al pilote 1. Las curvas fueron obtenidas a una profundidad de 9.8 m medida desde la superficie, en esta región se observa que el comportamiento reacción- desplazamiento lateral es marcadamente lineal, ya que en esta región el desplazamiento lateral del pilote es muy pequeño y los esfuerzos de reacción del suelo también lo son.

De lo anterior es necesario comentar que, en pilotes largos no es posible alcanzar la falla de todo el suelo que rodea el pilote imponiendo una carga en el cabezal, entonces la región del suelo que rodea la base del pilote desarrolla fuerzas de reacción muy pequeñas y

también los desplazamientos laterales allí son de baja magnitud, por lo tanto, es natural que la curva $p-y$ obtenida tenga una tendencia lineal puesto que los esfuerzos y las deformaciones se encuentran en el rango elástico.

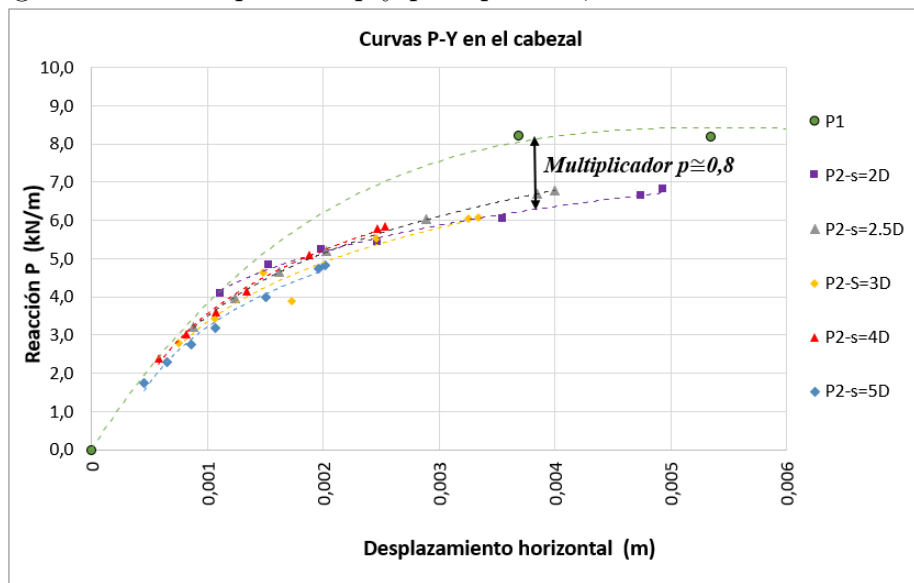
Figura 3.28: Curva $p-y$ en la base del pilote 2, modelos con cabezal libre



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.29 se comparan: la curva reacción desplazamiento en el cabezal obtenido del pilote individual y las curvas obtenidas para el segundo pilote, en las curvas se puede identificar que al implementar la metodología de multiplicadores $p-y$ contemplada en el CCP-14 y resumida en la Tabla 1.1, en este caso se obtiene un *multiplicador p* de 0.8 para la fila delantera, no obstante, como se observa en la gráfica este multiplicador solo es válido para espaciamientos entre pilotes de $2.5D$ y $3D$ y se ajusta bien para niveles de desplazamiento del pilote 2 superiores a 3 mm.

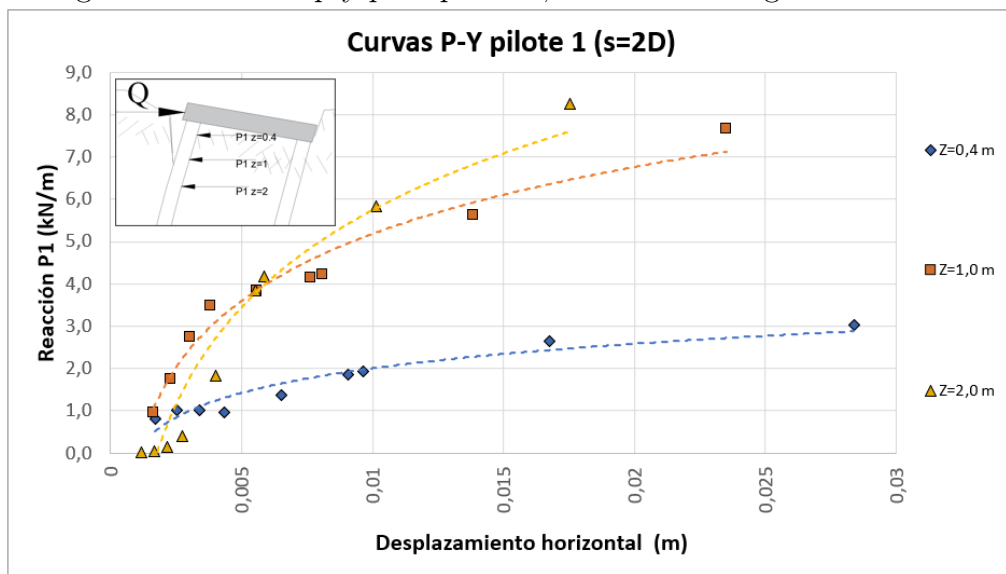
Figura 3.29: Multiplicador $p-y$ para pilote 2, modelos con cabezal libre



Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvieron las curvas reacción-desplazamiento para los modelos de grupos de dos pilotes unidos con una viga cabezal. En la Figura 3.30 se muestran las curvas $p-y$ obtenidas para el pilote 1 a profundidades $z=0.4$ m, 1.0 m y 2.0 m., en las curvas se identifica el aumento en la rigidez del suelo con la profundidad. La curva mostrada en la Figura 3.30 se obtuvo para el modelo cuya separación entre pilotes es $2D$, a diferencia de los modelos con cabezal libre, en los modelos de pilotes unidos con viga, la magnitud de la fuerza de reacción del suelo que rodea el pilote 1 está influenciada por la cercanía del pilote 2. Como se mostró en la Figura 3.24 en la porción del suelo que se localiza entre los dos pilotes ocurren simultáneamente esfuerzos laterales de compresión y de extensión cuya magnitud varía dependiendo de la distancia entre los dos pilotes y de la magnitud de la carga aplicada, como consecuencia las curvas $p-y$ en el cabezal para el pilote 1 son diferentes en cada caso de separación entre pilotes.

Figura 3.30: Curva $p-y$ para pilote 1, modelos con viga en el cabezal

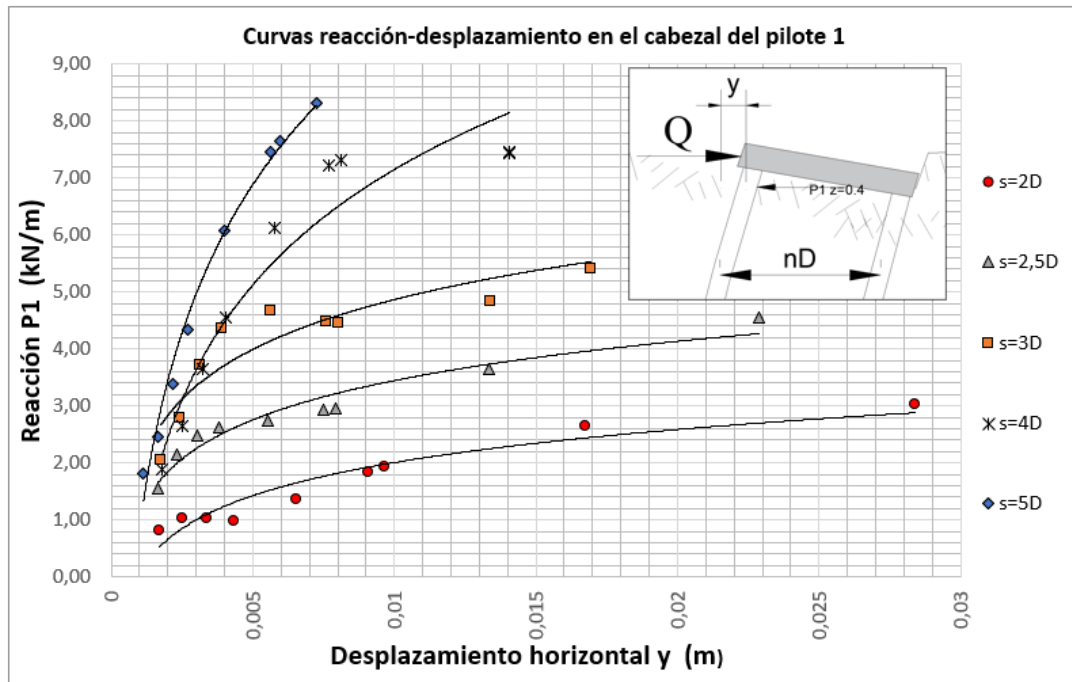


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.31 se graficaron las curvas $p-y$ obtenidas a una profundidad $y=0.4$ m muy cercanas al cabezal del pilote 1, se observa que en la región del suelo cercana al cabezal el suelo situado entre los dos pilotes se carga más conforme crece la separación entre pilotes, esto se evidencia en la pendiente promedio de cada una de las curvas mostradas en la Figura 3.31.

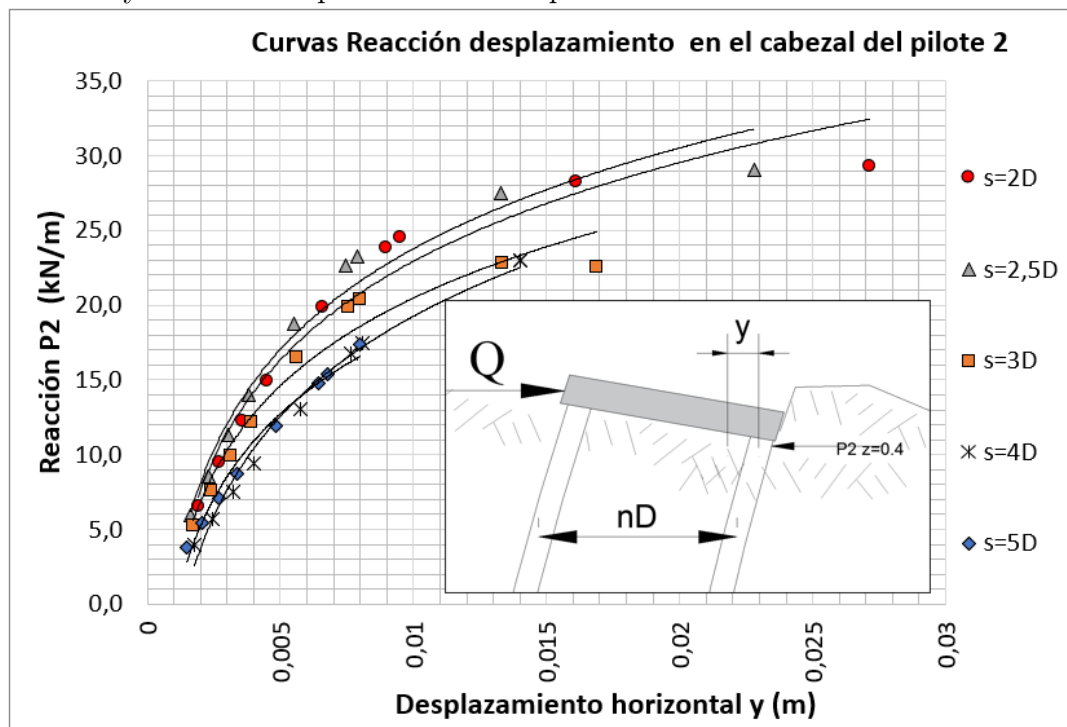
Como se mostró en la Figura 3.23 en pilotes sometidos a carga lateral la reacción del suelo se concentra en las regiones más cercanas a la superficie y la fuerza de reacción del suelo entre los pilotes unidos por el cabezal está influenciada por la separación entre ellos. Las curvas $p-y$ obtenidas en el cabezal del pilote 2 se muestran en la Figura 3.32, en estas curvas se observa de nuevo que la relación entre la fuerza de reacción del suelo y el desplazamiento lateral es marcadamente no lineal, también se identifica que la reacción calculada en la región de suelo que rodea el pilote está influenciada por la separación entre los dos pilotes que conforman el grupo.

Figura 3.31: Curvas reacción -desplazamiento en el cabezal del pilote 1, modelos con viga en el cabezal y diferentes separaciones entre pilotes



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.32: Curvas reacción -desplazamiento en el cabezal del pilote 2, modelos con viga en el cabezal y diferentes separaciones entre pilotes



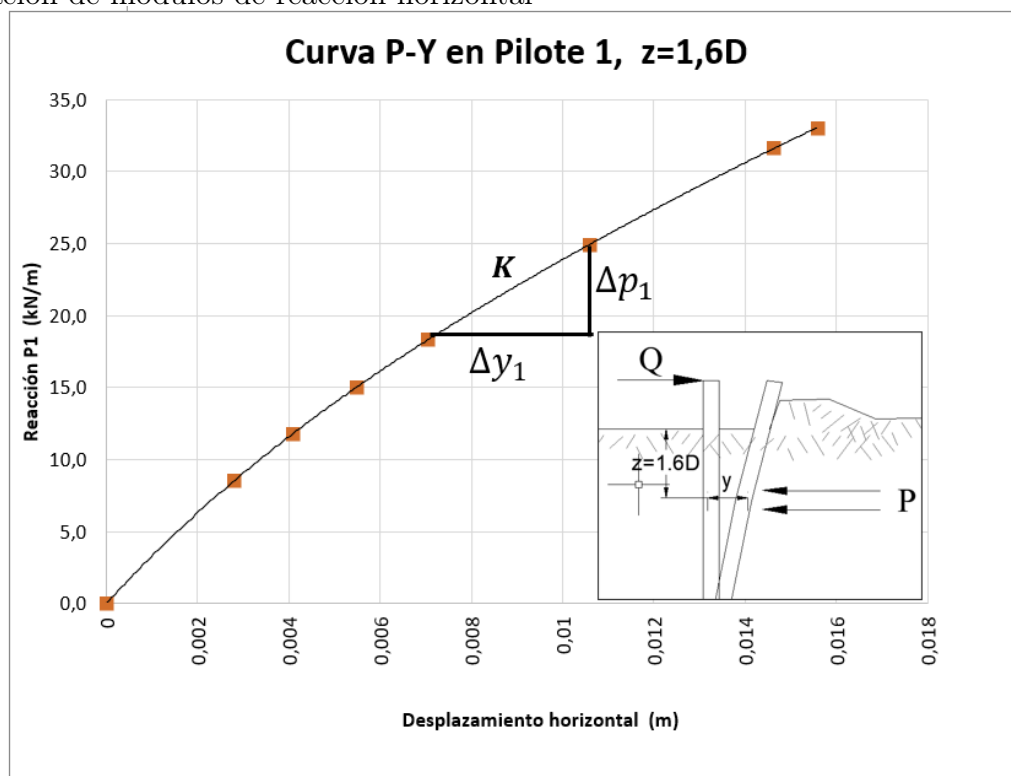
Fuente: Elaboración propia.

3.6. Módulos de reacción horizontal

Se estimaron los módulos de reacción horizontal como la pendiente entre puntos sucesivos de las curvas $p-y$ a diferentes profundidades del pilote 1 en la condición de cabezal libre, la Figura 3.33 ilustra la metodología de obtención del módulo de reacción calculado, por ejemplo, a una profundidad de 1.6 veces el diámetro.

En la Figura 3.34 se muestra el rango en el que varía la magnitud del módulo de reacción obtenido para profundidades de hasta 5 veces el diámetro y para 7 incrementos de carga en el cabezal.

Figura 3.33: Fuerza de reacción del suelo en pilote 1 contra desplazamiento horizontal, estimación de módulos de reacción horizontal



Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la Figura 3.34 para un suelo homogéneo, el módulo de reacción horizontal tiende a aumentar conforme se avanza en profundidad, además se identifica que el módulo depende del nivel de esfuerzos, porque a mayor carga aplicada en el cabezal se obtuvieron menores valores de módulo de reacción. Es decir que se concluye que el módulo de reacción lateral depende del esfuerzo vertical y también del esfuerzo desviador, de la siguiente forma:

$$K \propto \sigma_{zis}$$

$$K \propto \frac{1}{\sigma_1 - \sigma_3} \tag{3.1}$$

Figura 3.34: Estimación de módulos de reacción horizontal en pilote 1

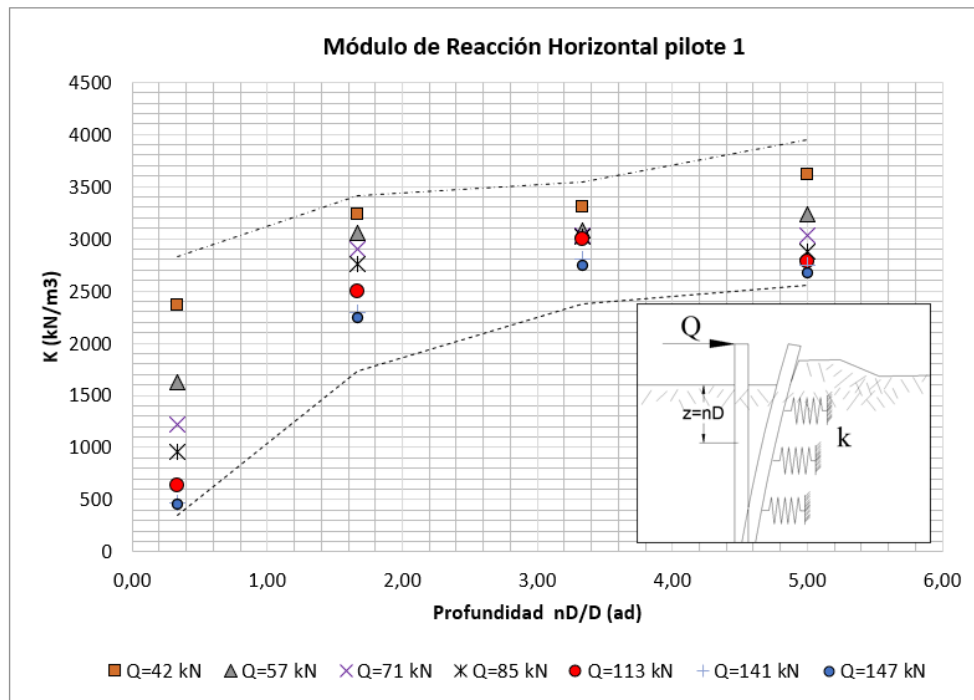
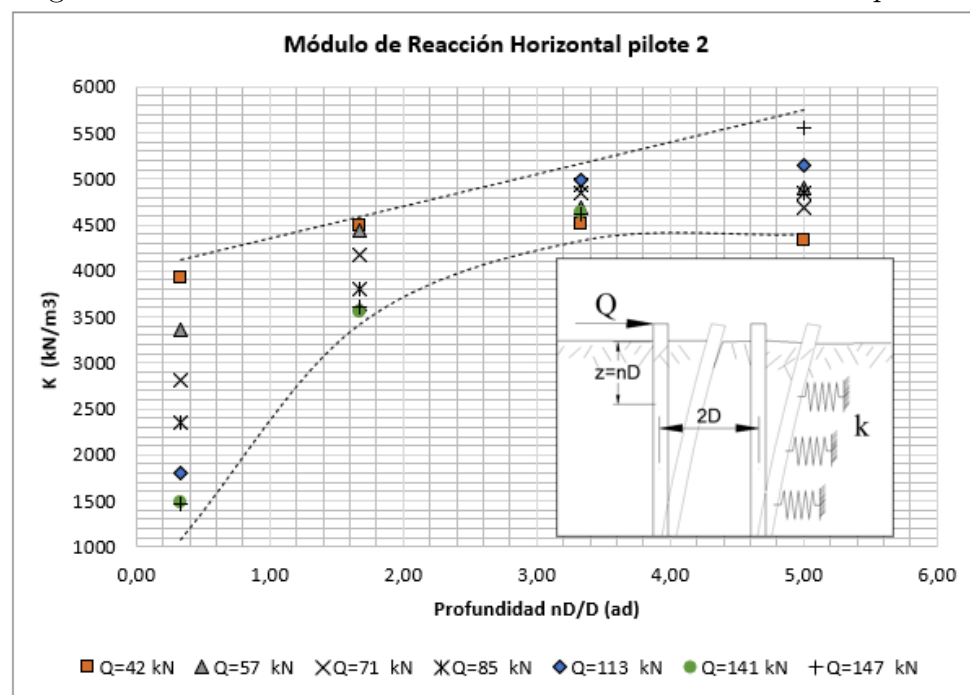


Figura 3.35: Estimación de módulos de reacción horizontal en pilote 2



Mediante la obtención de los desplazamientos laterales y las fuerzas de reacción en el suelo que rodea el pilote sometido a carga lateral, es posible obtener las curvas $p-y$ y a partir de estas estimar los módulos de reacción de la subrasante. No obstante, como se evidenció, en sistemas de pilotes unidos por el cabezal se deben considerar todas las fuerzas que contribuyen a la reacción del suelo.

Capítulo 4

CONCLUSIONES

En este trabajo desarrollado con el método de elementos finitos se evidencia la dificultad asociada a la necesidad del cambio de tamaño de la malla de elementos finitos al pasar del pilote al suelo. Se identificó que la calidad del análisis de pilotes usando modelos de elementos finitos está asociada al tamaño de los elementos que rodean el pilote ya que, en estas regiones se espera que ocurran los cambios más significativos de esfuerzos y desplazamientos. Debido a la diferencia significativa entre la magnitud del volumen que simula el pilote y la del volumen que simula el suelo que lo circunda, el cambio de tamaño de la malla de elementos finitos al pasar del pilote al suelo genera la necesidad de densificar la malla en esas regiones, esto con el fin de lograr un cambio gradual y progresivo en el tamaño de los elementos y a la vez obtener resultados confiables. El proceso de densificación del mallado obliga a utilizar un número muy grande de elementos, en consecuencia, el procesamiento requerido sobrepasa la capacidad de cálculo de los computadores disponibles aun siendo relativamente potentes. Esto imposibilitó analizar grupos de pilotes complejos, limitando los cálculos a la interacción entre dos pilotes adyacentes localizados espacialmente en diferentes configuraciones posibles dentro de un grupo.

Los primeros cálculos mostraron problemas de inconsistencia del método, pues la carga lateral generaba grandes incrementos en el esfuerzo vertical, ello obligó a usar una interfaz delgada de bajo módulo de corte alrededor de los pilotes para solventar el problema.

El cálculo de la influencia de un pilote cargado lateralmente sobre un pilote localizado detrás del mismo resultó imposible de analizar pues se generaban esfuerzos de tracción en los elementos de suelo situados entre los pilotes, situación que condujo a inestabilidades numéricas que hacían colapsar el programa FEM usado.

En este trabajo se implementaron adaptaciones a los modelos de elementos finitos que permitieron modelar la interacción del suelo con el pilote, entendido como un elemento volumétrico, y a la vez fue posible obtener de forma directa los diagramas de fuerza cortante y momento flector del pilote entendido como un elemento unidimensional estructural tipo viga.

Para los elementos tipo volumen el programa PLAXIS 3D® entrega información de los esfuerzos nodales, estos datos se utilizaron para estimar la fuerza de reacción en los elementos de suelo que rodean cada pilote. Para este fin se extrajo la información de esfuerzos en los nodos de la interfaz suelo-pilotes localizándolos con coordenadas (xyz) . Para calcular la fuerza de reacción se integró el esfuerzo en el perímetro y la longitud de los pilotes.

De los cálculos realizados se observó que el efecto de grupo predomina sobre el comportamiento de los pilotes cuando la separación entre estos es pequeña. En pilotes unidos con una viga cabezal, a pequeñas separaciones entre pilotes los cálculos obtenidos a través del método de los elementos finitos pusieron en evidencia el efecto pronunciado de grupo. Esto es, se observó que el pilote cargado lateralmente presenta bajas reacciones puesto que al trabajar como grupo buena parte de la carga aplicada se distribuye en la fricción que se desarrolla en las caras verticales perimetrales al grupo y en la cara de la base, al igual que al frente del pilote vecino. Se observó que las fuerzas de reacción del suelo alrededor de los pilotes pueden ser menores a las que se obtienen en un pilote aislado porque se presentan efectos de sombra o de borde.

La interacción entre pilotes de un grupo es función de la separación entre pilotes y del ángulo de partida. Para los modelos sin viga cabezal se obtuvo que, en un grupo de dos pilotes, la presencia de un pilote vecino, para efectos prácticos, no influye en las reacciones del pilote cargado.

Se obtuvo que los diagramas de cortante y momento de los pilotes en el grupo, varían de acuerdo con la posición relativa del pilote evaluado y el punto y dirección de aplicación de la carga.

En los modelos se encontró que la relación que se obtuvo entre la magnitud de la carga aplicada y el momento flector máximo desarrollado en los pilotes, tanto en el pilote 1 (cargado) como en el pilote 2 (vecino), es marcadamente lineal, esta misma tendencia la obtuvieron Matlock et al. (1980) en sus experimentos en grupos de pilotes con carga lateral estática. Se encontró además que, en grupos de pilotes con cabezal libre, a medida que el pilote vecino se localiza más lejos del pilote cargado, se desarrollan fuerzas cortantes y momentos flectores menores en el pilote vecino, este mismo efecto se identificó en los grupos de pilotes donde se varió el ángulo de partida.

Se identificó que en el pilote vecino el momento flector máximo se desarrolló a profundidades cada vez mayores conforme se aumentó la distancia entre ejes y el ángulo de partida.

Por el método de integración de esfuerzos se calculó la fuerza de reacción en el suelo que rodea los pilotes tanto delante como detrás, se encontró que, en pilotes con cabezal libre, para una separación entre pilotes de 5 veces el diámetro, la fuerza de reacción en el suelo que circunda el pilote 2 es en promedio del 11 % de la carga aplicada en el cabezal del pilote 1. Con lo anterior, se puede decir que, para separaciones mayores a 5 veces el diámetro, en pilotes con cabezal libre, la influencia sobre el pilote 2 es tan pequeña que se puede considerar insignificante en el diseño.

Al comparar la magnitud del momento flector máximo en los pilotes con cabezal libre, se encontró que el momento máximo del pilote 2 disminuye drásticamente con la separación entre pilotes, de tal manera que para una separación de 5 veces el diámetro no se presenta interacción.

Los momentos flectores que desarrolla el pilote delantero en un grupo son iguales a los que desarrolla un pilote individual bajo la misma carga, esta misma observación fue hecha por Brown et al. (1988), en sus resultados de experimentos sobre grupos de pilotes en arenas y ante carga lateral.

En los modelos donde se varió el ángulo de partida se encontró que para una misma separación centro a centro, a mayor ángulo de partida, menor es el desplazamiento que alcanza el cabezal del pilote vecino, se encontró además que la relación entre la profundidad a la que ocurre el momento máximo y el ángulo de partida tiene forma de "S" y se puede aproximar a la función arcotangente de β .

Se ensamblaron modelos de grupos de dos pilotes unidos por el cabezal a través de una viga, se encontró que el sistema parece soportar más carga cuanto más unidos están los pilotes, en este tipo de modelos se encontró que a medida que la separación entre los pilotes es mayor, el suelo situado en el espacio entre los dos pilotes se carga más. Es decir, que cuando el segundo pilote se localiza a distancias centro-centro pequeñas, por ejemplo, inferiores a $2.5D$, el sistema de cimentación tiende a comportarse como una gran zapata que involucra el perímetro del grupo de pilotes y el suelo localizado entre los pilotes. En este tipo de modelos se encontró además que como consecuencia de la existencia de la viga cabezal, en la cabeza del pilote se desarrollan fuerzas cortantes diferentes a la carga aplicada y momentos flectores no nulos.

Se concluyó que en pilotes largos sometidos a carga lateral la reacción del suelo se concentra en las regiones más cercanas a la superficie, esta observación también fue realizada por Brown et al. (1988) en sus experimentos para estudiar el efecto de sombra en grupos de pilotes con carga lateral. Otra conclusión importante es que el comportamiento de grupos de pilotes con carga lateral está fuertemente influenciado por las condiciones de restricción en el cabezal y para modelar el comportamiento de estos sistemas en modelos de elementos es altamente recomendable la calibración a partir de datos experimentales.

Se obtuvieron las fuerzas de reacción horizontal en la interfaz suelo-pilotes y se pudo observar que si el pilote es suficientemente largo, la región del suelo localizada cerca a la base del pilote y frente al mismo sufre un proceso de descarga y su estado de esfuerzos tiende hacia el esfuerzo activo sin llegar a alcanzarlo, contrario a lo que sucede en los puntos localizados cerca al cabezal y al frente del pilote, allí, dependiendo del valor de la carga aplicada, el esfuerzo horizontal llega a tomar valores tan altos como los del empuje pasivo.

Con las fuerzas de reacción halladas en el suelo que rodea los pilotes y los cálculos del desplazamiento lateral en cada etapa de carga se graficaron curvas reacción -desplazamiento a diferentes profundidades. Se encontró que, dado que en pilotes largos no es posible alcanzar la falla de todo el suelo que rodea el pilote imponiendo una carga en el cabezal, entonces la región del suelo que rodea la base del pilote desarrolla fuerzas de reacción de baja magnitud comparada con la carga aplicada y también los desplazamientos laterales allí son de baja magnitud, por lo tanto, la curva reacción-desplazamiento obtenida tiene una tendencia lineal puesto que los esfuerzos y las deformaciones se encuentran en el rango elástico. En contraste, las curvas reacción-desplazamiento obtenidas en la región cercana al cabezal son marcadamente no lineales.

Se estimaron módulos de reacción horizontal a diferentes profundidades y con diferentes niveles de carga, se encontró que, para un suelo homogéneo, el módulo de reacción horizontal tiende a aumentar conforme se avanza en profundidad, además se identificó que el módulo depende del nivel de esfuerzos. Es decir que el módulo de reacción lateral depende del esfuerzo vertical *in situ* y también del esfuerzo desviador, de forma que es proporcional al primero e inversamente proporcional al segundo.

Mediante la obtención de los desplazamientos laterales y las fuerzas de reacción en el suelo que rodea el pilote sometido a carga lateral, es posible obtener las curvas *reacción-desplazamiento* y a partir de estas estimar los módulos de reacción. No obstante, es necesario comentar que, el uso de herramientas basadas en programas de elementos finitos implica la implementación de adaptaciones a los modelos, con el fin de lograr un grado de verosimilitud aceptable entre los resultados obtenidos y lo que se espera del sistema en cuanto a su comportamiento real, con esta motivación se realizó la calibración inicial del modelo a partir de datos experimentales. Considerando lo anterior el uso del método de elementos finitos se propone como una alternativa para la estimación de módulos de reacción y obtención de curvas *p-y*.

En el proceso de calibración, para reproducir los datos experimentales de momento flector a lo largo del pilote y de carga -desplazamiento en el cabezal, con el modelo 3D no basta con ensamblar los elementos que ofrece PLAXIS 3D® y asignar las propiedades de los materiales, se hace necesario implementar algunas adaptaciones adicionales. También se encontró que es posible usar los elementos que ofrece el software para análisis de estructuras con el fin de simular un pilote embebido en el suelo y obtener los diagramas de interés en el diseño estructural, sin obviar la interacción entre el fuste del pilote y el suelo.

Bibliografía

- Brinch Hansen, J (1961) The ultimate resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces, Geoteknisk Institut Bull, No 12, Copenhagen
- Broms, B.B. (1964-1) Lateral resistance of piles in cohesive soils, Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, 90(2),: 27–63.
- Broms, B.B. (1964-2) Lateral resistance of piles in cohesionless soils, Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, 90(3),: 123–156.
- Brown, D.A., Morrison, C. and Reese, L.C. (1988) Lateral load behavior of pile group in sand, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 114(11),: 1261–1276.
- Clancy And Randolph (1993), An approximate analysis procedure for pile raft foundation, Numerical and analytical methods in geomechanics, pp 849-869.
- Dao, TPT. (2011) Validation of PLAXIS Embedded Piles For Lateral Loading, Master of science thesis, Delft University of Technology.
- Fleming, K. Weltman, A., Randolph, M. Elson, (2009) K. Piling engineering. Taylor y Francis.
- Focht John A. Jr., Koch Kenneth J. (1973) Rational Analysis of the Lateral Performance of Offshore Pile Groups, Offshore Technology Conference, Houston, Texas.
- Gonzalez, N. (2021). Comportamiento de pilotes cargados lateralmente en un medio que endurece por deformación. Tesis de maestría Universidad Nacional de Colombia.
- Hernandez, R. (2011). Análisis de pilotes cargados lateralmente, mediante interacción suelo estructura, empleando una teoría simplificada de empujes, Tesis de maestría Universidad Nacional de Colombia. Dir. Félix Hernández Rodríguez. Ing. Civil, Msc
- Poulos H. G., Davis E. H., (1980) Pile foundation analysis and design, Series in geotechnical Engineering, University of Sydney
- Hsai-Yang Fangdic (2012). Foundation Engineering Handbook -Edition 2. Springer Science & Business Media. Library of Congress Catalog Card Number: 89-70490 ISBN 978-1-4757-5273-1
- Jiménez S. J.A. (1980) Geotecnia y Cimientos III: Cimentaciones, excavaciones y aplicaciones de la geotecnia. Publicaciones Escuela T.S. Madrid, España, Cap. 3.
- Matlock, H., W.B. Ingram, A.E. Kelley and D. Bogard (1980) Field tests of the lateral-load behaviour of pile groups in soft clay. Proc. 12th Annual Offshore Technology Conf., Houston, pp. 163–174.
- Méndez, L. (2017) Pilotes sometidos a carga lateral dinámica: análisis mediante interacción suelo estructura, Tesis de maestría Universidad Nacional de Colombia
- Molendijk, J.A.W.(2018) The influence of group effects on micropile behaviour, Plaxis 3D modeling, Master of science thesis Delft University of Technology.
- Ochoa, M. O'Neill, M.W. (1989) Lateral pile interaction factor in submerged sand, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 115(3): 359–378.
- Prakash, S. & Saran, D. (1967) Behaviour of Laterally-Loaded Piles in Cohesive soils. Proc. 3rd Asian Conference. S. M 235-238.

- Peck, Hanson and Thornburn, (1974) *Foundation Engineering*, Second Edition, Cap 10, Cap 12.
- Reese, L.C. and Van Impe, W.F. (2010) *Single piles and pile groups under lateral loading*, 2da. Edición. Editor CRC Press. Cap 1-6.
- Selby, A.G. and Poulos, H.G. (1984) Lateral load tests on model pile groups, *Proceedings of the Fourth Australia-New Zealand Conference on Geomechanics*, Perth, pp. 154–158.
- Ruesta, P.F. and Townsend, F.C. (1997) Evaluation of laterally loaded pile group at Roosevelt Bridge, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123(12): 1153–1161.
- Veerhoef, R.M (2015). *Laterally loaded piles in sloping ground*, Master of science thesis Delft University of Technology.
- Viggiani Carlo, Alessandro Mandolini, Gianpiero Russo. (2012). *Piles and pile foundation*. 1st Ed. Spon Press. Cap 8, Cap 9.