



Neiva, 29 de septiembre del 2022

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Cesar Augusto Triviño Oviedo, con C.C. No. 1117540945

Gabriela Ibarra Penagos, con C.C. No. 1075320590,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado: Análisis en elementos finitos de pilotes helicoidales sometidos a compresión y tensión, mediante un modelo calibrado considerando datos de campo. Presentado y aprobado en el año 2022 como requisito para optar al título de Ingeniero Civil;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

EL AUTOR/ESTUDIANTE: Cesar Augusto Triviño Oviedo.

Firma: _____

EL AUTOR/ESTUDIANTE: Gabriela Ibarra Penagos.

Firma: _____



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 3
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Análisis en elementos finitos de pilotes helicoidales sometidos a compresión y tensión, mediante un modelo calibrado considerando datos de campo.

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Triviño Oviedo	Cesar Augusto
Ibarra Penagos	Gabriela

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Gil Hernandez	Jackson Andrés

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
N.A	N.A

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero civil

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería civil

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2022

NÚMERO DE PÁGINAS: 58

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas X Fotografías___ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general___ Grabados___ Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas o Cuadros X

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: N.A

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



MATERIAL ANEXO: N.A

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

Español

1. Pilotes helicoidales
2. Modelo de elementos finitos (MEF)
3. PLAXIS 2D
4. Compresión
5. Tensión

Inglés

1. Helical piles
2. Finite element model (MEF)
3. PLAXIS 2D
4. Compression
5. Tension

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Esta investigación realizó un estudio paramétrico sobre pilotes helicoidales mediante modelos de elementos finitos. Los análisis de elementos finitos se llevaron a cabo en el software Plaxis 2D considerando dos modelos axisimétricos calibrados, cuyos resultados se verificaron y compararon con los resultados de investigaciones experimentales de pilotes helicoidales sometidos a compresión y tensión. Los modelos calibrados se utilizaron para realizar el estudio paramétrico, modificando la separación entre placas, el número de placas helicoidales y el diámetro de las placas. Los resultados permitieron determinar que una separación $s/D < 3$ no es conveniente puesto que genera una falla por cizallamiento cilíndrico disminuyendo la capacidad del pilote, por otra parte, usar más de tres placas en los pilotes helicoidales no representa un incremento significativo en la capacidad del pilote, mientras que aumentar el diámetro de las placas helicoidales permite una mayor superficie de apoyo lo cual influye directamente en la capacidad.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

This research conducted a parametric study on helical piles using finite element models. Finite element analyses were carried out in the Plaxis 2D software considering two calibrated axisymmetric models, the results of which were verified and compared with the results of experimental investigations of helical piles subjected to compression and tension. The calibrated models were used to carry out the parametric study in which the separation between plates, the number of helical plates and the diameter of the plates were modified. The results allowed to determine that a separation $s/D < 3$ is not convenient since it generates a cylindrical shear failure decreasing the capacity of the pile, moreover, using more than three plates in helical piles does not represent a significant increase in the capacity of the pile, while increasing the diameter of helical plates allows for a larger supporting surface which directly influences capacity.

APROBACION DE LA TESIS

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	3 de 3
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

Nombre presidente Jurado:

Firma:

Nombre Jurado: Luz Divia Quimbaya Cuellar

Firma:

Nombre Jurado: José Miguel Díaz Coral

Firma:



Análisis en elementos finitos de pilotes helicoidales sometidos a compresión y tensión, mediante un modelo calibrado considerando datos de campo.

Gabriela Ibarra Penagos

Cesar Augusto Triviño Oviedo

Universidad Surcolombiana de Colombia

Facultad de ingeniería, Ingeniería Civil

Neiva, Colombia

2022

Análisis en elementos finitos de pilotes helicoidales sometidos a compresión y tensión, mediante un modelo calibrado considerando datos de campo.

Gabriela Ibarra Penagos

Cesar Augusto Triviño Oviedo

Proyecto de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero(a) Civil

Director:

M.Sc, Jackson Andrés Gil Hernández

Línea de Investigación:

Geotecnia - Cimentaciones profundas (Pilotes Helicoidales)

Universidad Surcolombiana de Colombia

Facultad de Ingeniería, Ingeniería Civil

Neiva, Colombia

2022

(Dedicatoria o lema)

En algún lugar, algo increíble está esperando ser conocido.

Carl Sagan.

Agradecimientos

Agradecemos a Dios, nuestros padres y familiares por apoyarnos en cada parte de esta etapa; por construirnos como personas, por el tiempo y por confiar en nosotros. Lo que somos y seremos les pertenece, después de todo nadie podría lograrlo solo.

Agradecemos al ingeniero Jackson Andrés Gil por su guía y acompañamiento constante y por las prácticas que también hacen parte del aprendizaje.

Muchas gracias a todos los que de una u otra forma hicieron parte de esto.

Resumen

Esta investigación realizó un estudio paramétrico sobre pilotes helicoidales mediante modelos de elementos finitos. Los análisis de elementos finitos se llevaron a cabo en el software Plaxis 2D considerando dos modelos axisimétricos calibrados, cuyos resultados se verificaron y compararon con los resultados de investigaciones experimentales de pilotes helicoidales sometidos a compresión y tensión. Los modelos calibrados se utilizaron para realizar el estudio paramétrico, modificando la separación entre placas, el número de placas helicoidales y el diámetro de las placas. Los resultados permitieron determinar que una separación $s/D < 3$ no es conveniente puesto que genera una falla por cizallamiento cilíndrico disminuyendo la capacidad del pilote, por otra parte, usar más de tres placas en los pilotes helicoidales no representa un incremento significativo en la capacidad del pilote, mientras que aumentar el diámetro de las placas helicoidales permite una mayor superficie de apoyo lo cual influye directamente en la capacidad.

Palabras clave: Pilotes helicoidales, Modelo de elementos finitos (MEF), PLAXIS 2D, compresión, tensión.

Abstract

This research conducted a parametric study on helical piles using finite element models. Finite element analyses were carried out in the Plaxis 2D software considering two calibrated axisymmetric models, the results of which were verified and compared with the results of experimental investigations of helical piles subjected to compression and tension. The calibrated models were used to carry out the parametric study in which the separation between plates, the number of helical plates and the diameter of the plates were modified. The results allowed to determine that a separation $s/D < 3$ is not convenient since it generates a cylindrical shear failure decreasing the capacity of the pile, moreover, using more than three plates in helical piles does not represent a significant increase in the capacity of the pile, while increasing the diameter of helical plates allows for a larger supporting surface which directly influences capacity.

Keywords: Helical piles, Finite element model (MEF), PLAXIS 2D, compression, tension.

Contenido

	Pág.
Resumen	VIII
Lista de figuras	XII
Lista de tablas.....	XIII
Lista de Símbolos y abreviaturas	XIV
Capítulo 1	15
1. Introducción	15
1.1 Antecedentes	17
1.2 Justificación	20
1.3 Objetivos.....	21
1.4 Estructura del documento	21
Capítulo 2	21
2. Marco teórico	23
2.1 Pilotes helicoidales	23
2.1.1 Instalación	24
2.1.2 Torque mínimo de instalación	25
2.2 Modelo de elementos finitos (MEF)	25
2.2.1 Plaxis 2D	26
Capítulo 3	29
3. Metodología	29
3.1 Investigación experimental	30
3.2 Investigación del sitio y parámetros de resistencia de los materiales.....	32
3.3 Generación de modelos.....	33
3.3.1 Modelo de elementos finitos (MEF)	33
3.3.2 Geometría del modelo	36
3.3.3 Criterio para la capacidad última del pilote.....	37

3.4	Calibración del modelo.....	39
3.4.1	Caso 1: Pilote sometido a tensión en el sitio 1.....	39
3.4.2	Caso 2: Pilote sometido a compresión en el sitio 2.....	39
3.5	Análisis paramétrico.....	40
	Capítulo 4.....	45
4.	Resultados y discusión.....	45
4.1	Efecto del número de placas helicoidales en la capacidad de carga.....	45
4.2	Efecto del diámetro de las placas helicoidales en la capacidad de carga.....	47
4.3	Efecto de la separación entre placas helicoidales en la capacidad de carga.....	48
	Capítulo 5.....	52
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	52
5.1	Conclusiones.....	52
5.1	Recomendaciones.....	53
	Bibliografía.....	55

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Pilotes helicoidales. Tomado de Tectónica (s.f)	24
Figura 2-2: Instalación de pilotes helicoidales. Tomado de Tectónica (s.f)	24
Figura 2-3: Modelo de deformación plana (izquierda) y modelo axisimétrico (derecha). Tomado de Brinkgreve (2004)	27
Figura 3-1: Esquema de la metodología empleada	30
Figura 3-2: Esquema de prueba a compresión para pilotes. Tomado de Livneh y El Naggar (2008)	31
Figura 3-3: Modelo axisimétrico de elementos finitos. Tomado de Rawat y Gupta (2017) .34	
Figura 3-4: Modelado del caso 1 en plaxis 2D	35
Figura 3-5: Modelado del caso 2 en plaxis 2D	36
Figura 3-6: Geometría del pilote del modelo experimental y el pilote modelado en Plaxis	37
Figura 3-7: Curva típica de carga-desplazamiento para pilotes	38
Figura 3-8: Valores de carga-desplazamiento del modelo experimental y del MEF	40
Figura 4-1: Curva cargas-desplazamiento obtenidas mediante MEF de pilotes helicoidales con diferente número de placas	47
Figura 4-2: Curva cargas-desplazamiento obtenidas mediante MEF de pilotes helicoidales con diferentes diámetros	48
Figura 4-3: Curva cargas-desplazamiento obtenidas mediante MEF de pilotes helicoidales con diferente separación entre placas	50
Figura 4-4: Mecanismo de falla para pilotes helicoidales a partir de los MEF	51

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1: Propiedades del suelo del pilote sometido a tensión. Sitio 1	33
Tabla 3-2: Propiedades del suelo del pilote sometido a compresión. Sitio 2	33
Tabla 3-3: Propiedades del pilote en el MEF	35
Tabla 3-4: Criterios de falla para estimar la capacidad ultima de pilotes a compresión y tensión (adaptado de Livneh y El Naggar 2008)	38
Tabla 3-5: Configuración de los pilotes helicoidales para el análisis del efecto del número de hélices	42
Tabla 3-6: Configuración de los pilotes helicoidales para el análisis del efecto del diámetro	42
Tabla 3-7: Configuración de los pilotes helicoidales para el análisis del efecto de la separación	43

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolo o abreviatura	Término	Unidad SI
A	Área transversal del pilote	m^2
ASTM	American Society for Testing and Materials	
C	Cohesión en el suelo	kPa
CD	Prueba consolidada-drenada	
CU	Prueba consolidada-no drenada	
C_u	Resistencia al corte no drenado promedio	kN/m^2
D	Diámetro de la placa helicoidal	
D_i	Diámetro de la primera hélice	
E	Módulo de elasticidad	kN/m^2
K_t	Relación empírica de torque	
L	longitud del pilote	M
L_f	Zona lineal final	
L_i	Zona lineal inicial	
MEF	Método de elementos finitos	
O.D	Diámetro externo o exterior	
Q	Capacidad última	kN
Q_u	Resistencia última del pilote helicoidal	kN
s	Separacion entre helices	
SPT	Standard Penetration Test	
T	Torque mínimo de instalación	N-m
T_h	Torque necesario para la penetración de las hélices en el suelo	
T_s	Torque por fricción lateral del fuste	N-m
UU	Prueba no consolidada-no drenada	
ν	Coeficiente de Poisson	
φ	Ángulo de fricción	°
γ	Peso unitario del suelo	kN/m^3
γ	Peso unitario del acero	kN/m^3
γ_{sat}	Peso unitario saturado del suelo	kN/m^3

Capítulo 1

1. Introducción

La cimentación utilizada para transmitir las cargas de una edificación al suelo depende en gran medida de la capacidad portante del suelo y el tipo de construcción; generalmente en suelos con capacidad portante alta se utilizan cimentaciones superficiales como zapatas y losas de cimentación. Pero, en los casos donde el suelo tiene baja resistencia, es necesario utilizar otro tipo de cimentaciones que garantice la capacidad de soportar todas las cargas solicitadas por la estructura, por lo cual se puede optar por el uso de pilotes que se instalan en el suelo con el objetivo de alcanzar estratos de mayor resistencia.

El uso de pilotes como alternativa de cimentación profunda, ha generado que en la actualidad existan diferentes tipos de pilotes y materiales con los cuales están contruidos o fabricados estos elementos. Los pilotes más utilizados son los pilotes hincados cuya resistencia está dada por la combinación de la resistencia que aporta el fuste mediante el rozamiento lateral, y la resistencia que aporta la punta al alcanzar el estrato de mayor resistencia donde se apoya (Das, 2012). El uso de pilotes hincados no siempre garantiza que se pueda soportar la carga requerida y en algunas ocasiones es muy difícil o costoso hincarlos por lo cual es necesario implementar otro tipo de pilotes como lo son los pilotes helicoidales (también llamados pilotes roscados o de tornillo) que están formados por un eje central cuadrado o circular de acero, al cual se fijan una o varias placas circulares de forma helicoidal (Lanyi-Bennett y Deng, 2019).

Aunque en principio los pilotes helicoidales se usaron como anclajes para soportar cargas de levantamiento; en las últimas décadas su aplicación y uso ha aumentado, siendo ampliamente utilizados como solución de cimentación en terrenos poco compactos, soportando cargas de tensión, compresión y laterales (Salem y Hussein, 2017). Su facilidad de instalación mediante el uso de par de torción y presión hacia abajo (Zhang y otros, 1998), representa una ventaja significativa, puesto que reduce el impacto en estructuras vecinas, disminuye los tiempos de instalación y además presenta mayor capacidad en comparación con pilotes perforados, esto se debe a que las placas helicoidales aumentan el área de apoyo del pilote (George y otros, 2020).

La exigencia de torque para la instalación de pilotes helicoidales depende principalmente de las condiciones del suelo y la geometría del pilote (Spagnoli y Tsuha, 2020), en la media en que

aumenta el diámetro de las placas helicoidales, aumenta también la fricción de estas con el suelo, lo que implica un requerimiento mayor de torque para instalarlos. El mejoramiento de equipos para generar torsión permite que en la actualidad se puedan usar pilotes helicoidales de mayor diámetro en respuesta al aumento de los requerimientos de carga que tienen las estructuras. Su uso es adecuado para cualquier tipo de proyecto, desde la cimentación de postes de luz y turbinas eólicas, hasta la cimentación de edificios residenciales y comerciales (Elsherbiny y El Naggar, 2013).

El diseño de pilotes helicoidales requiere realizar estudios de suelos que permita determinar la capacidad de carga que puede tener un pilote de acuerdo con sus características mecánicas y geométricas, además del tipo de falla que se genera. Esto permite comprender el comportamiento que tendrá una cimentación mediante un sistema de pilotes helicoidales garantizando así la seguridad de las construcciones futuras.

La capacidad de los pilotes helicoidales se puede evaluar utilizando diferentes metodologías; las investigaciones experimentales requieren la instalación de los pilotes para posteriormente realizar las pruebas de carga in situ con el fin de determinar su capacidad de carga antes, y durante la falla, pero estas pruebas resultan muy costosas en términos de tiempo y dinero. Por otra parte, la capacidad se puede evaluar analíticamente mediante la falla de las placas helicoidales individuales o mediante falla por cizallamiento cilíndrico, lo cual depende de la separación entre las placas (Nabizadeh y Choobbasti, 2017; Salem y Hussein, 2017).

En la actualidad el desarrollo de software permite que diferentes problemas de ingeniería se solucionen a partir de la generación de modelos de elementos finitos, de esta manera, la capacidad de los pilotes helicoidales se puede evaluar mediante el uso de modelos numéricos, convirtiéndose en una herramienta fundamental para obtener soluciones aproximadas y acertadas; evitando las dificultades que presenta la realización de pruebas experimentales. La exactitud de los resultados obtenidos de los Modelos de Elementos Finitos depende de los datos experimentales utilizados para la recreación del comportamiento del suelo real y las limitaciones del software donde se realicen los modelos.

Teniendo en cuenta las limitaciones técnicas y económicas que se presentan para realizar pruebas experimentales que permitan comprender el comportamiento de los pilotes helicoidales, resulta pertinente el uso de modelos de elementos finitos con el fin de realizar investigaciones sobre la capacidad de carga de los pilotes, y el tipo de falla que se genera al alcanzar dicha capacidad.

Con el fin de obtener claridad sobre el comportamiento de los pilotes helicoidales. El presente trabajo evaluará la influencia que tiene los parámetros geométricos (el número de placas helicoidales, el diámetro de las placas y la separación); en la capacidad a compresión y tensión de los pilotes helicoidales. El análisis paramétrico, se llevará a cabo, a partir de modelos de

elementos finitos generados en el software Plaxis 2D empleando los resultados obtenidos y presentados en la investigación “Axial testing and numerical modeling of square shaft helical piles under compressive and tensile loading” realizada en la universidad Western Ontario en Canadá.

El suelo modelado tendrá las características y parámetros suministrados por la investigación experimental, y su comportamiento se calibra a partir de los resultados propios de la investigación experimental, lo que permite que el suelo en el modelo de elementos finitos tenga el mismo comportamiento que el suelo real. Posteriormente los modelos calibrados serán utilizados para generar modelos con cambios en la geometría del pilote con el fin de obtener la inferencia de cada parámetro modificado en la capacidad ultima de los pilotes helicoidales.

1.1 Antecedentes

Teniendo en cuenta la eficiencia de los pilotes helicoidales, diferentes autores han propuesto investigaciones referentes al uso, la capacidad y el comportamiento mecánico de estos pilotes ante cargas axiales de compresión y tensión en diferentes tipos de suelo; por lo cual, en la actualidad existen numerosas investigaciones con el fin de determinar su capacidad. Los esfuerzos de los investigadores también están orientados a obtener nuevas metodologías que permitan evaluar la capacidad de los pilotes helicoidales reduciendo el tiempo de las pruebas y obteniendo resultados más precisos.

La capacidad de los pilotes helicoidales generalmente se determina de manera experimental, a partir de pruebas de carga estática; lo que suele tardar mucho tiempo y tener un costo elevado; por lo cual, cada vez es más común proponer pruebas dinámicas de alta deformación para determinar la capacidad de pilotes helicoidales de gran diámetro. Sakr (2013) realizó una evaluación de la capacidad estática de pilotes hincados de 6 y 9 metros y pilotes helicoidales simples y dobles de 9 metros de longitud con un diámetro de hélice de 0.61 metros a partir de dos tipos de prueba. En principio se realizaron pruebas de carga estática y posteriormente se realizaron pruebas de carga dinámica con el fin de comparar los resultados y determinar la eficiencia del uso de pruebas dinámicas de alta deformación; donde concluyó que las pruebas de carga dinámica pueden ser una herramienta útil para evaluar la capacidad estática de pilotes, teniendo como ventaja la rapidez con la que se puede realizar la prueba.

Elkasabgy y El Naggar (2015), realizaron pruebas experimentales de carga axial a seis pilotes helicoidales y un pilote hincado de gran capacidad en suelos cohesivos, con el objetivo de investigar su desempeño de manera individual y además para determinar el mecanismo de transferencia de carga, y la capacidad ultima de los mismos. El estudio fue llevado a cabo usando pilotes helicoidales con una longitud de 6 y 9 metros los cuales fueron instalados aplicando un momento de giro en sentido de las manecillas del reloj considerando una tasa de penetración de un paso de la placa helicoidal por revolución con el fin de disminuir la perturbación del suelo. La

realización de las pruebas de carga para los pilotes de 6 metros de longitud se llevó a cabo 2 semanas después de la instalación mientras que los pilotes de 9 metros fueron probados 9 meses después de su instalación con el fin de determinar la influencia que tiene la perturbación del suelo al momento de realizar la instalación de los pilotes en su mecanismo de falla. La investigación demostró que la capacidad de un pilote helicoidal se ve disminuida por la perturbación en el suelo y la variación de parámetros como el diámetro y el número de hélices, puesto que estos parámetros definen el tipo falla y por ende la capacidad última de los pilotes.

Del mismo modo Elkasabgy y El Naggar (2015), establecen que los pilotes helicoidales alcanzan su capacidad máxima cuando se generan desplazamientos significativos en condiciones de carga iguales o ligeramente aumentadas con lo cual proponen diferentes métodos para determinar su capacidad última teniendo en cuenta que no siempre las pruebas de carga de pilotes muestran una carga máxima bien definida.

Fatnanta y Satibi (2018) proponen el uso de pilotes helicoidales en suelos donde se presenten gruesas capas de turba teniendo en cuenta que los pilotes hincados nunca alcanzan estratos más resistentes; en su investigación realizaron ensayos a escala real para determinar la capacidad de carga de una cimentación con pilotes helicoidales en suelos con alto contenido orgánico donde consideraron diferentes diámetros y espaciamientos para las placas helicoidales, concluyendo que los pilotes con tres placas helicoidales uniformes tienen mayor capacidad de carga que los pilotes con una y dos placas helicoidales y que su capacidad portante se ve afectada por el espacio entre las placas.

Tsuha y otros (2012) realizaron un estudio experimental con cargas ascendentes para determinar la capacidad de pilotes helicoidales que funcionaban como anclajes en arena. Instalaron 12 tipos de pilotes con diferente número de placas helicoidales en dos contenedores de arena seca de diferente densidad, los cuales se sometieron a cargas de levantamiento con el fin de examinar el efecto que tienen el número de hélices en el desempeño de los pilotes helicoidales teniendo en cuenta la perturbación generada por la instalación en el suelo. Las pruebas mostraron que la perturbación del suelo al momento de instalar los pilotes helicoidales depende del diámetro de las placas y la densidad relativa de la arena lo que afecta en su capacidad, además se establece que en pilotes de menor diámetro el número de placas mejora su capacidad ante cargas de levantamiento, pero en pilotes de gran diámetro la capacidad no aumenta de manera significativa con el aumento del número de placas.

Polishchuk y Maksimov (2017), Realizaron pruebas experimentales en pilotes helicoidales destinados a la cimentación de edificios temporales prefabricados; los ensayos se llevaron a cabo en pilotes de una y dos placas helicoidales en suelo arcilloso. Determinaron que instalar una segunda placa en los pilotes helicoidales aumenta su capacidad a compresión en arcillas hasta en un 30% en comparación con los pilotes de una sola placa. Posteriormente realizaron un análisis

numérico mediante el programa MIDAS GTS NX, donde se observó que un pilote con doble hélice desarrolló un comportamiento de cizallamiento cilíndrico y presentó mayor capacidad portante con respecto al pilote de una única hélice. A partir de los resultados experimentales y el análisis numérico en MIDAS GTS NX establecieron que el análisis numérico se puede utilizar para evaluar la capacidad portante de los pilotes helicoidales teniendo en cuenta que al comparar los resultados experimentales y teóricos la diferencia en la evaluación de la capacidad de los pilotes no excedía el 10%.

De manera similar Salem y Hussein (2017) mediante ensayos experimentales estudiaron el comportamiento de los pilotes helicoidales en suelos cohesivos y sin cohesión con el fin de determinar la capacidad a tracción de pilotes con dos hélices de 200 mm de diámetro y una separación entre las placas de 2.5 veces el diámetro de las placas helicoidales. Posteriormente utilizaron los resultados experimentales para realizar un modelo mediante el software de elemento finitos ADINA, los resultados del modelo fueron verificados con base en el estudio experimental. A partir de la calibración, modelaron diferentes geometrías del pilote para realizar un estudio paramétrico que permitió concluir que los parámetros que más influyen en la capacidad de levantamiento del pilote helicoidal son la profundidad de empotramiento, la resistencia del suelo y el número de hélices.

Alwalan y Naggar (2020) proponen un análisis de elementos finitos para pilotes helicoidales sometidos a pruebas dinámicas de alta deformación usando PLAXIS 2D, en donde se determinó la influencia del número de placas helicoidales, la separación entre placas helicoidales, el peso del martillo y la altura de caída en la capacidad estática de los pilotes helicoidales, con el fin de establecer un procedimiento y diseño eficiente para llevar a cabo una prueba dinámica de alta deformación. En su investigación simulaban pilotes helicoidales instalados en suelos arenosos y arcillosos usando el modelo aximétrico de elementos finitos generado en Plaxis 2D. Posteriormente realizaron pruebas de carga estática y pruebas de carga dinámica de alta deformación con la finalidad de comprender el comportamiento de los pilotes al ser sometidos a dichas pruebas. Finalmente, establecieron directrices para el diseño de pruebas dinámicas de alta deformación eficaces tanto en pilotes helicoidales como en pilotes hincados desarrolladas en modelos de elementos finitos.

En la actualidad cada vez son más las investigaciones cuyos resultados obtenidos de los modelos de elementos finitos se ajustan a los resultados de pruebas experimentales (Li y Deng, 2019; Aboshita y otros, 2020), permitiendo la utilización de modelos de elementos finitos en la realización de investigaciones.

1.2 Justificación

El desarrollo social, urbano y de infraestructura regional y nacional ha generado la necesidad de construir en cualquier tipo de suelo; incluyendo los suelos de baja capacidad en donde las cimentaciones profundas permiten superar las limitaciones técnicas y logran transmitir al suelo las cargas solicitadas por la estructura. Los pilotes helicoidales representan una opción de cimentación profunda viable debido a su facilidad de instalación en áreas de acceso limitado con bajos niveles de ruido y vibración presentando rentabilidad en comparación a otro tipo de pilotes (Elkasabgy y El Naggar, 2015); además permiten recibir cargas inmediatamente después de su instalación.

Teniendo en cuenta las ventajas que presenta el uso de pilotes helicoidales como alternativa de cimentación es pertinente realizar investigaciones que permitan determinar el comportamiento de estos pilotes ante cargas de compresión y tensión. Considerando las limitaciones presentes en las investigaciones experimentales ya relacionadas en el apartado de antecedentes, los modelos de elementos finitos calibrados a partir de los resultados de un trabajo experimental permitirán realizar investigaciones para mejorar la comprensión sobre el comportamiento y la capacidad mecánica de pilotes helicoidales ante cargas de compresión y tracción.

Aunque existen diferentes investigaciones sobre pilotes helicoidales, ninguna de ellas presenta un estudio paramétrico completo en donde se involucren los parámetros: el número de hélices, el diámetro y la separación en suelos finos compuestos por limos, arcillas y arenas. Es por lo anterior que esta investigación busca, realizar un estudio paramétrico en pilotes helicoidales mediante modelos numéricos calibrados, para determinar la influencia que tienen los parámetros antes mencionados en su capacidad a compresión y tensión.

La realización de esta investigación resulta pertinente para fomentar la participación de los ingenieros civiles Surcolombianos en el estudio de nuevas alternativas de cimentaciones que cada vez toman más importancia en el ámbito mundial. Además, realizar la investigación mediante la generación de modelos calibrados con resultados experimentales en el software de elementos finitos Plaxis 2D, permite que en el futuro se pueda implementar este método de investigación como alternativa funcional a las investigaciones experimentales teniendo en cuenta las limitaciones técnicas y económicas que estas presenta.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Realizar un estudio paramétrico en pilotes helicoidales mediante modelos numéricos calibrados, para determinar la influencia que tiene el número de placas helicoidales, el diámetro de las placas y la separación; en su capacidad a compresión y tensión.

1.3.2 Objetivos específicos

- Calibrar modelos de elementos finitos en el software Plaxis 2D que describan el comportamiento de un suelo real compuesto por estratos de limos, arcillas y arenas; a partir de resultados de una investigación experimental.
- Generar un análisis paramétrico a partir de los modelos calibrados, modificando el número de placas, el diámetro y la separación, con el fin de determinar la influencia que tiene la variación de cada parámetro en la capacidad última de los pilotes helicoidales.
- Determinar la influencia que tienen el mecanismo de falla en la capacidad última de los pilotes helicoidales y cómo influye cada uno de los parámetros variados en la generación de dicha falla.

1.4 Estructura del documento

Este documento contiene cinco capítulos consecutivos que se resumen brevemente a continuación:

En el capítulo 1 se presentan la introducción, los antecedentes que corresponden a estudios relacionados con el diseño y la capacidad de carga de pilotes helicoidales y la realización de investigaciones sobre estos pilotes a partir de modelos de elementos finitos. Finalmente contiene la justificación y los objetivos de la investigación.

El capítulo 2 contiene el marco teórico con conceptos generales sobre los pilotes, haciendo énfasis en los pilotes helicoidales donde se incluye su método de instalación mediante torsión. Se presentan también los parámetros de resistencia y deformación del suelo además de ensayos que permiten conocer dichos parámetros, teniendo en cuenta que son indispensables para determinar la capacidad de los pilotes helicoidales a partir de modelos numéricos. Finalmente se explica el método de elementos finitos, el software Plaxis 2D y el modelo axisimétrico utilizado para realizar estudio paramétrico.

En el capítulo 3 se expone la metodología utilizada para llevar a cabo esta investigación partiendo de un esquema gráfico que constituye el paso a paso para la realización del estudio paramétrico

y el alcance de los objetivos propuestos. En principio se explica el procedimiento experimental de donde se extraen los parámetros del suelo y los resultados que permiten calibrar los modelos generados. Posteriormente se explica la geometría utilizada y los aspectos relevantes de la generación de los modelos de elementos finitos en Plaxis 2D, se muestra cómo se realiza la calibración de los modelos y finalmente se detallan los parámetros geométricos modificados de los pilotes helicoidales y como se llevó a cabo el estudio paramétrico.

El capítulo 4 muestra los resultados obtenidos del estudio paramétrico una vez se corrió el programa y se extrajeron los datos. Se presenta las gráficas de carga-desplazamiento realizadas a partir de los resultados obtenidos con Plaxis 2D y se expone la discusión sobre el efecto que tiene cada uno de los parámetros modificados en la capacidad máxima de los pilotes helicoidales.

Por último, el capítulo 5 corresponde a las conclusiones y recomendaciones basadas en los resultados del estudio paramétrico de pilotes helicoidales realizado mediante modelos de elementos finitos en Plaxis 2D.

Capítulo 2

2. Marco teórico

2.1 Pilotes helicoidales

Los pilotes helicoidales, son un tipo de cimentación profunda, o poco profundas que proporcionan estabilidad contra la compresión, cargas laterales y tensionales. (Müller, 2014).

Los pilotes helicoidales son elementos constituidos por placas circulares con forma de hélices, soldadas a un fuste o árbol del mismo material (Figura 2-1). El fuste es usado para transmitir el torque durante la instalación, transferir cargas axiales a las placas helicoidales y suministrar resistencia al ataque lateral. El pilote metálico helicoidal de múltiples hélices es adecuado para ser utilizado en diversos tipos de suelos, no así en suelos extremadamente duros o rocosos. Son particularmente útiles en depósitos de arcilla profundos. (Portella, 2007)

En la actualidad, en América latina se encuentran dimensiones estándar de pilotes helicoidales de los siguientes tamaños: 2.875 pulgadas O.D y 3.5 pulgadas O.D., en acero grado 40 y/o grado 80, con una, dos o tres hojas de 8", 10" o 12" (o combinadas), en secciones de 4 pies hasta 7 pies de longitud. (TMG, s.f)



Figura 2-1 Pilotes helicoidales. Tomado de Tectónica (s.f)

2.1.1 Instalación

Se utiliza un motor hidráulico para generar rotación e introducir la punta del pilote en la tierra (Figura 2-2), el torque necesario para introducir el pilote en el terreno se divide en dos partes, una resistida por la fricción lateral del fuste (T_s) y la otra que es la necesaria para lograr que las hélices del pilote penetren en el suelo (T_h) (Müller, 2014). Se debe seleccionar una metodología constructiva que permita monitorear y garantizar la capacidad de cada pilote instalado mediante el monitoreo constante del torque de instalación.



Figura 2-2 Instalación de pilotes helicoidales. Tomado de Tectónica (s.f)

2.1.2 Torque mínimo de instalación

Las hélices de los pilotes helicoidales sirven dos propósitos: proveer un medio de instalación (similar al de un taladro con un tornillo) y transferir la carga axial al estrato de apoyo, por lo tanto, el diseño apunta a estos dos. Por ello, AB Chance desarrolló una correlación empírica entre el torque mínimo que debe alcanzar el pilote helicoidal durante su instalación a fin de asegurar la capacidad axial última de diseño. Esta correlación no posee definición en el mundo tradicional de la geotecnia; sin embargo, ha sido corroborada en miles de proyectos a lo largo de Estados Unidos en las últimas décadas. Esta correlación empírica se determina de la siguiente manera (Anfonssi, 2019):

$$\frac{Q_u}{T} = K_t$$

En donde:

Q_u : Resistencia última del pilote helicoidal.

T : Torque mínimo de instalación.

K_t : Relación empírica de torque.

Se puede observar que la relación entre el torque y la resistencia última del pilote helicoidal es directa y no depende del número de hélices o el tamaño de estas. Se deduce, entonces, que una hélice de menor diámetro puede alcanzar la misma capacidad que una mayor, si esta es instalada a una profundidad mayor. (Anfonssi, 2019).

2.2 Modelos de elementos finitos (MEF)

El método de elementos finitos es una herramienta de cálculo matemático integrado en distintos softwares, que consiste en un método de aproximación para evaluar y analizar problemas en donde un continuo se divide en un número finito de elementos, cuyo comportamiento de determina a partir de un número finito de parámetros relacionados a ciertos puntos específicos conocidos como nodos. La respuesta en un elemento, en cualquier momento, se interpola desde la respuesta en los nodos del elemento. Cada nodo está descrito en detalle por un cierto número de parámetros, según el tipo de análisis o del elemento utilizado.

El software formula las ecuaciones que rigen el comportamiento de cada elemento teniendo en cuenta su conectividad con los demás elementos. Estas ecuaciones hacen referencia a la respuesta de cargas, restricciones y propiedades del material conocidas, el programa organiza las ecuaciones en un conjunto mayor de ecuaciones algebraicas simultáneas y resuelve las desconocidas. (Gómez, s.f)

2.2.1 Plaxis 2D

Para este proyecto se utilizó el software completo de análisis geotécnico PLAXIS 2D, que realiza análisis bidimensionales de elementos finitos sobre deformación y estabilidad en ingeniería geotécnica. El software permite analizar problemas estáticos y dinámicos con geometrías muy variables, complejas e irregulares, ya sea en suelo o en roca y teniendo en cuenta (o no) el acoplamiento hidromecánico. Incorpora una gran variedad de modelos constitutivos elásticos y elastoplásticos, así como elementos estructurales especialmente concebidos para modelizar pilotes, anclajes, puntales, bulones y placas. Así mismo, permite considerar planos de deslizamiento y la interacción suelo-estructura por medio de elementos de tipo “interfase”. El usuario puede estudiar también problemas de flujo considerando sistemas de bombeo y de rebajamiento del nivel freático y llevar a cabo análisis de estabilidad (seguridad) y de consolidación de suelos. PLAXIS 2D se caracteriza por disponer de una interfaz de usuario intuitiva y sencilla, que permite al usuario llevar a cabo la construcción y definición del modelo numérico y el análisis, postproceso y visualización de los resultados del cálculo de forma rápida, precisa y eficaz. Además, pone a disposición del usuario la posibilidad de emplear comandos (mediante un lenguaje propio) para facilitar y agilizar la creación y el cálculo del modelo de elementos finitos y el estudio de los resultados. (Bentley, s.f)

Plaxis utiliza procedimientos de entrada gráfica simple que permiten una generación eficiente de los modelos de elementos finitos (MEF), así mismo, ofrece una presentación detallada de los resultados. Los cálculos que se emplean son totalmente automatizados y basados en procedimientos numéricos. Cabe resaltar que, al tratarse de una simulación, el modelo no estará en su totalidad libre de errores, el éxito de los resultados depende también de la experiencia con que se modele y comprenda el problema. (Camargo & Gozales, 2011)

Para desarrollar el análisis de elementos finitos en dos dimensiones, PLAXIS 2D cuenta con dos métodos de análisis (Figura 2-3). El primer método es de deformación plana (Plane strain), se utiliza en geometrías con una sección transversal relativamente uniforme en las cuales pueda suponerse que los determinados estados tensionales y de cargas son uniformes a lo largo de una determinada longitud perpendicular a la sección transversal en dirección z , en esta dirección, los desplazamientos y deformaciones se consideran nulos, no obstante, los esfuerzos si se consideran. El segundo método es el axisimétrico (Axisymmetric), se utiliza en geometrías con una sección transversal radial relativamente uniforme y un esquema de carga alrededor del eje central que permita suponer estados tenso-deformacionales iguales en cualquier dirección radial; se debe tener en cuenta que en este modelo la coordenada x representa el radio y la coordenada y corresponde al eje de simetría, en ningún caso se pueden utilizar coordenadas x negativas. (Brinkgreve, 2004).

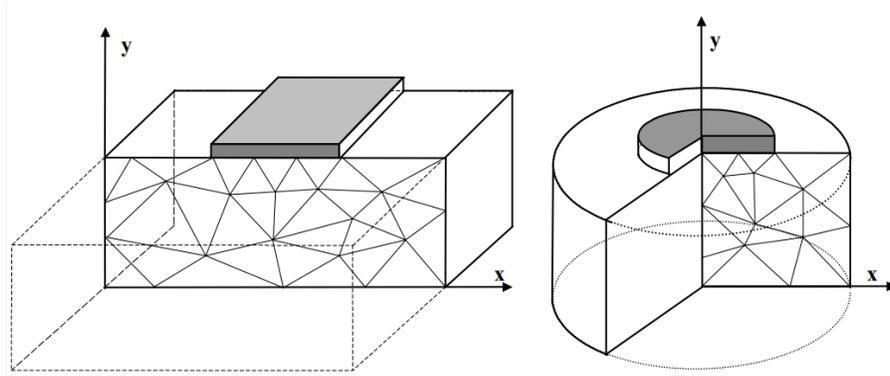


Figura 2-3 Modelo de deformación plana (izquierda) y modelo axisimétrico (derecha). Tomado de Brinkgreve (2004)

Capítulo 3

3. Metodología

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para realizar el estudio paramétrico de pilotes helicoidales sometidos a compresión y tensión, con el fin de determinar la capacidad máxima alcanzada por cada pilote helicoidal teniendo en cuenta la variación de su geometría (número de hélices, separación y el diámetro de las placas helicoidales). El estudio se fundamenta a partir de los resultados obtenidos y presentados en el artículo de investigación experimental “Axial testing and numerical modeling of square shaft helical piles under compressive and tensile loading” realizada por Livneh y El Naggar (2008).

Se realizaron dos modelos axisimétricos de elementos finitos (modelo numérico a compresión y modelo numérico a tensión), los cuales recrearon la geometría y las características mecánicas del estudio experimental, teniendo en cuenta las restricciones que presenta Plaxis 2D. Posteriormente se simuló el suelo a partir de los parámetros de resistencia y deformación de los materiales que se determinaron en la investigación experimental.

Los modelos generados se calibraron en función de los resultados del estudio experimental realizado por Livneh y El Naggar (2008), buscando que las curvas de carga-desplazamiento de los modelos de elementos finitos coincidieran con los de las curvas del estudio experimental. Finalmente, los modelos calibrados simularon el comportamiento del suelo real ante cargas de compresión y tensión, con lo cual se generaron variaciones en la geometría de los pilotes para realizar el estudio paramétrico. Se presenta a continuación un esquema general de la metodología (Figura 3-1) adoptada en el desarrollo de la investigación el cual será detallado a lo largo de este capítulo.

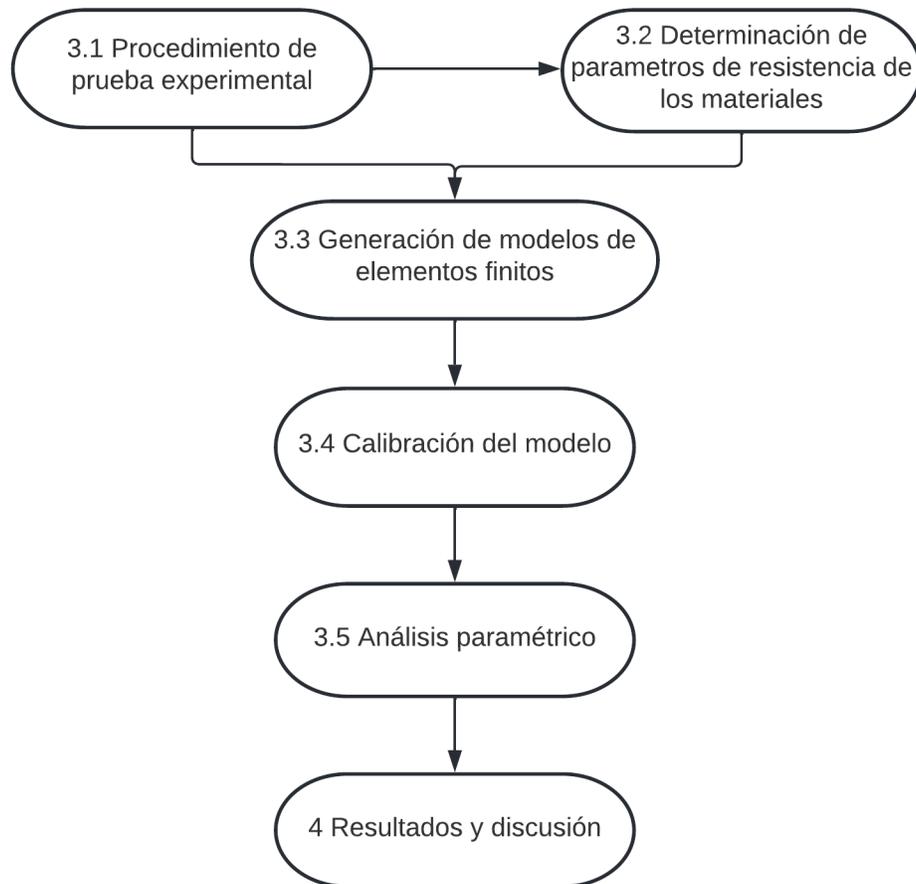


Figura 3-1 Esquema de la metodología empleada

3.1 Investigación experimental

Para realizar las pruebas experimentales Livneh y El Naggar (2008) instalaron en total, 19 pilotes helicoidales en dos sitios diferentes del campus de la universidad Western Ontario en Londres, Canadá. En el sitio 1 se instalaron 7 pilotes con una profundidad aproximada de 5 metros y 7 pilotes con una profundidad de 9 metros. Mientras que en el sitio dos se instalaron 5 pilotes que alcanzaron una profundidad de 7,8 metros.

En el proceso de instalación de los pilotes se realizaron lecturas del torque aplicado tomadas en intervalos de profundidad de 0,3 metros, dichas lecturas se utilizaron mediante una correlación para estimar la capacidad final del pilote lo que permite prescribir los incrementos de carga en el desarrollo de la prueba. La correlación se fundamenta en que el par de torsión de instalación es una medida de la fuerza requerida para superar la resistencia al corte del suelo por lo cual está directamente relacionada con la capacidad del pilote (Livneh y El Naggar, 2008).

La cavidad del fuste se llenó con lechada de cemento para evitar el pandeo del pilote además de proporcionar rigidez adicional a las conexiones que se realizaron para incrementar la longitud del pilote. También se instalaron pilotes de reacción a una distancia de 2.7 metros de los pilotes de prueba y con aproximadamente la misma profundidad para limitar eficazmente el área de prueba.

La figura 3-2 ilustra el diseño general utilizado por Livneh y El Naggar (2008) para realizar la prueba a compresión, se identifica el marco de reacción de la prueba compuesto por cuatro pilotes de reacción (en tensión), la viga de acero que permite los incrementos de carga limitando el gato hidráulico, dos vigas espaciadoras para los pilotes de prueba. La cabeza del pilote fue fijada usando un tubo de PVC de 150 mm de diámetro que se incrustó a una profundidad de 1,3 metros, sobre este se instaló otro tubo de PVC que se llenó de lechada el cual funciona como superficie plana y nivelada para el gato de carga. La carga utilizada se midió a través de una celda de carga calibrada entre el gato hidráulico y el bastidor de carga, además de las medidas registradas en la presión hidráulica del gato. De manera similar se realizó y tomaron las medidas de carga de la prueba a tensión. En ambos tipos de prueba los desplazamientos se controlaron mediante 3 relojes comparadores ubicados en el remate del pilote.

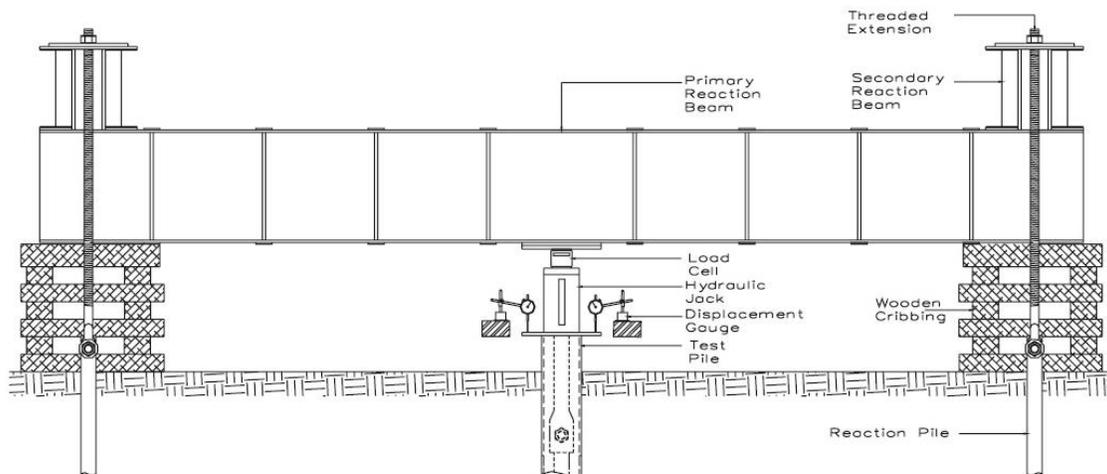


Figura 3-2 Esquema de prueba a compresión para pilotes. Tomado de Livneh y El Naggar (2008).

Las pruebas de carga axial a compresión y tensión se realizaron de acuerdo con ASTM D1143–81 (ASTM 1994) y ASTM D3689–90 (ASTM 1995) por lo cual las cargas se aplicaron en incrementos de carga de aproximadamente el 10% de la capacidad estimada del pilote en intervalos de tiempo de 5 minutos. La carga se incrementó en algunos casos más allá de la capacidad de carga estimada, hasta que se produjo la falla.

Para cada incremento de carga se tomaron y promediaron las lecturas de los tres relojes comparadores. Posteriormente, las lecturas de carga de las celdas se trazaron con las lecturas promediadas de los indicadores de desplazamiento para generar la curva de carga-

desplazamiento de cada pilote probado. A partir de las curvas de falla y mediante el uso de un criterio de falla se estimó la capacidad máxima de cada pilote. Los aspectos relacionados con la geometría del pilote helicoidal se especifican posteriormente.

3.2 Investigación del sitio y parámetros de resistencia de los materiales

Para determinar los parámetros de resistencia y deformación de los materiales, se consideraron las pruebas realizadas por Livneh y El Naggar (2008) en la investigación “Axial testing and numerical modeling of square shaft helical piles under compressive and tensile loading” en donde realizaron dos perforaciones (una en cada sitio) utilizando una barrena de vástago hueco montada en una plataforma. Posteriormente se realizaron dos ensayos de penetración estándar (SPT) que se llevaron a cabo en cada sitio a una profundidad mínima de 8 metros, usando un martillo de seguridad con una cuerda y un catéter, avanzando con un muestreo de cuchara partida.

Livneh y El Naggar (2008) también realizaron 3 pruebas triaxiales consolidadas no drenadas en muestras de suelo recuperadas a una profundidad de 2.4 metros para evaluar resistencia al corte, Angulo de fricción interna y cohesión efectiva.

Los parámetros de resistencia de los materiales determinados mediante pruebas triaxiales y pruebas SPT, permiten generar el perfil estratigráfico, arrojando que los suelos perforados están compuestos de capas de limo arcilloso y arenoso. Ambas capas recubren depósitos profundos de arcilla limosa rígida (sitio 1) o arena fina densa (sitio 2); en ambos sitios el suelo es sobreconsolidado teniendo en cuenta que tienen altos valores de cohesión (Livneh y El Naggar, 2008). Los valores finalmente fueron ajustados con respecto a los resultados obtenidos de carga-deflexión en las pruebas experimentales de los pilotes en campo.

A continuación, la tabla 3-1 muestra los parámetros del suelo del sitio 1 donde se ensayó el pilote a tensión, mientras que la tabla 3-2 muestra los parámetros del suelo del sitio 2 donde se obtienen los resultados de la prueba a compresión. Estos parámetros se tomaron de la investigación de Livneh y El Naggar (2008) y se usarán posteriormente para modelar el suelo en el software Plaxis 2D.

Propiedades del suelo del estudio experimental y el MEF

Estrato	Profundidad (m)	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	C (kPa)	ϕ (°)	E (kN/m ²)
Limo arcilloso arenoso marrón rígido	2.4	17.3	17.3	10	28	60000
Limo arcilloso marrón muy rígido (Profundidad N.F.)	4.1	17.5	18.5	21	27	85000
Limo arcilloso gris rígido	5.8	16.5	18.5	9	23	100000
Limo arcilloso arenoso gris muy rígido	7.3	15	18	20	30	400000
Limo gris denso	>7.3	17	19	19	34	65000

Tabla 3-1 Propiedades del suelo del pilote sometido a tensión. Sitio 1. Tomado de Livneh y El Naggar (2008).

Estrato	Profundidad (m)	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	C (kPa)	ϕ (°)	E (kN/m ²)
Limo arcilloso arenoso marrón rígido	2.6	18.5	18.5	22	33	40000
Limo arcilloso gris muy rígido (Profundidad N.F.)	5.2	17	19	23	27	300000
Arena fina gris densa, trazas de limo	>5.2	18	20	6	38	100000

Tabla 3-2 Propiedades del suelo del pilote sometido a compresión. Sitio 2. Tomado de Livneh y El Naggar (2008).

3.3 Generación de Modelos

3.3.1 Modelo de elementos finitos (MEF)

Para el modelado de los pilotes se utilizó el software de elementos finitos PLAXIS 2D el cual permite realizar el análisis de esfuerzo-deformación, y predecir el comportamiento de pilotes sometidos a cargas axiales estáticas y dinámicas (Alwalan y Naggar, 2020; Rawat y Gupta, 2017).

Teniendo en cuenta la simetría del pilote y las placas helicoidales; se utilizó el modelo axisimétrico de PLAXIS, puesto que es apropiado para cimentaciones circulares con sección transversal radial, además de ser el más utilizado para el modelamiento de pilotes (Brinkgreve y

otros, 2016; Hanna y Nguyen, 2002; Liao y otros, 2006). En el modelo axisimétrico el eje x es utilizado como el radio, mientras que el eje z , es el eje simétrico del suelo; como se muestra en la figura 3-3. Para proporcionar resultados de gran exactitud se usaron elementos triangulares de 15 nodos.

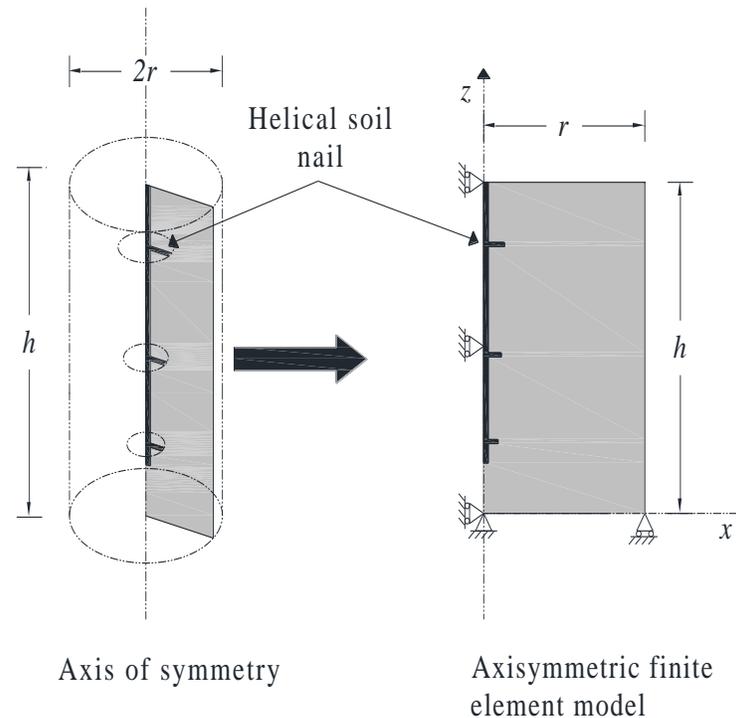


Figura 3-3 Modelo axisimétrico de elementos finitos. Tomado de Rawat y Gupta (2017).

Con el fin evitar cualquier interferencia mecánica producto de los límites del modelo, el límite horizontal del modelo se situó a una distancia de 1,5 veces la longitud total del pilote mientras que el límite inferior se situó a una profundidad de 2,5 veces la longitud total del pilote; lo que es superior a los límites mínimos ($L*2L$) recomendados por Alwalan y El Naggar (2020). En los límites laterales se permiten desplazamientos verticales y se restringen los desplazamientos horizontales y las rotaciones; mientras que, en el límite inferior, se restringen todos los desplazamientos y todas las rotaciones. Las Figuras 3-4b y 3-5b, muestran los estratos que forman parte de la geometría del modelo cuyos parámetros se detallaron con anterioridad. La malla del MEF se refina en el área cercana al pilote (Sección c de las figuras 3-4 y 3-5) para aumentar la precisión de los resultados de carga y desplazamiento. La zona 3 tiene un refinamiento grueso, mientras que en la zona 2 se usa un refinamiento medio y en la zona 1 se usa un refinamiento fino considerando que rodea el pilote.

En busca de una aproximación real al comportamiento del suelo, se usó el modelo elástico perfectamente plástico de Mohr-Coulomb que requiere cinco parámetros de entrada: el módulo de Young, E , el coeficiente de Poisson, ν , que definen el comportamiento elástico; el ángulo de

fricción, ϕ , el ángulo de dilatación, ψ , que definen el comportamiento plástico y la cohesión, C , que define el endurecimiento del material (Elsherbiny y El Naggar. 2013); Los parámetros utilizados en el modelo son los determinados en el estudio experimental los cuales se presentaron con anterioridad en las tablas 3-1 y 3-2.

Para el pilote helicoidal, se utilizó el modelo elástico lineal que requiere los dos parámetros de rigidez elástica: el módulo de Young, E y el coeficiente de Poisson, ν . La interacción correcta entre el pilote y el suelo a su alrededor se logró usando interfaces en ambos lados de las líneas geométricas del pilote (Figura 3-4a y 3-5a). Para el modelado del pilote se tomaron los valores estándar del acero que se presentan en la tabla 3-3.

	γ (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν
Pilote	78	2100000000	0.3

Tabla 3-3 Propiedades del pilote MEF.

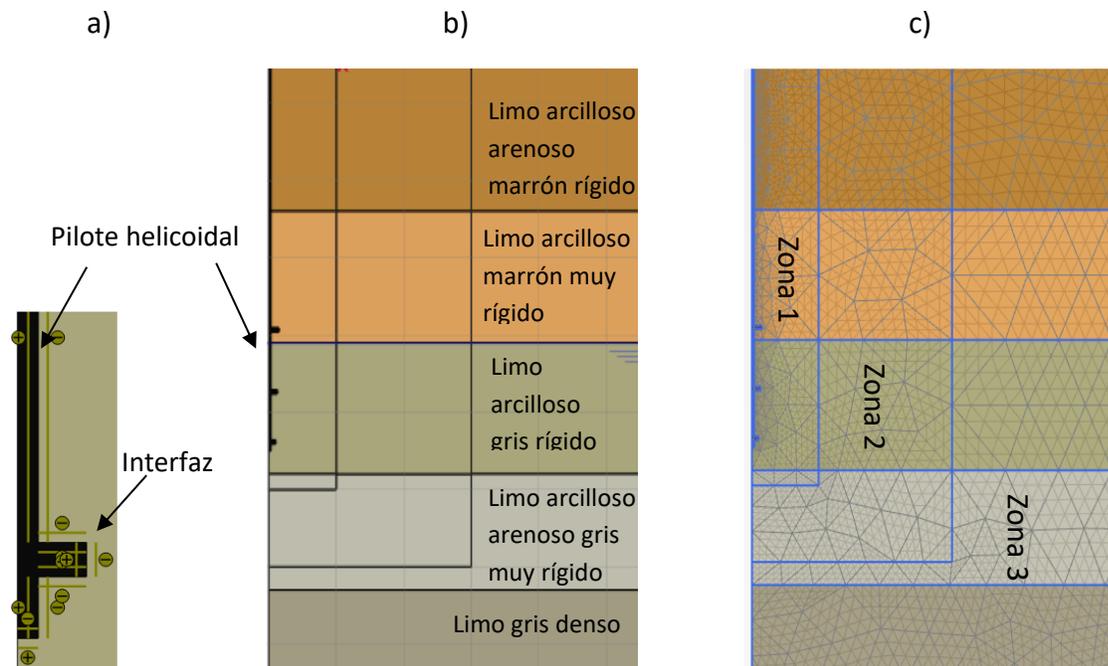


Figura 3-4 Modelado del caso 1 en plaxis 2D. **a)** Pilote helicoidal e interfaz suelo-pilote **b)** Geometría del modelo **c)** Malla generada

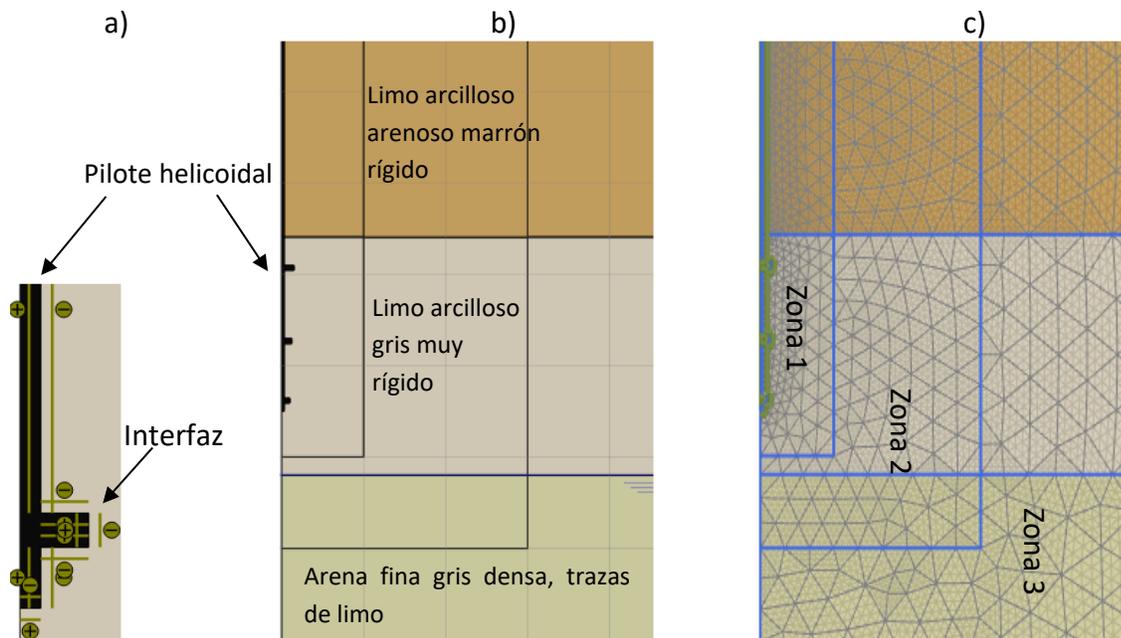


Figura 3-5 Modelado del caso 2 en plaxis 2D. **a)** Pilote helicoidal e interfaz suelo-pilote **b)** Geometría del modelo **c)** Malla generada

3.3.2 Geometría del modelo

Los MEF se realizaron a escala real adoptando casi toda la geometría del pilote del modelo experimental realizado por Livneh y El Nagggar (2008) como muestra la Figura 3-6. Solo tres aspectos de la geometría del pilote cambiaron en los MEF en relación con el modelo experimental: al tratarse de un modelo axisimétrico no es posible considerar un eje central con sección transversal cuadrada por lo cual el eje central del pilote se consideró como un tubo de sección transversal circular con un diámetro de 44,5 mm. Por otra parte, las placas helicoidales se modelaron como discos circulares y no como placas inclinadas; además la punta del pilote se tomó como plana y no biselada como en el modelo experimental. El número de placas helicoidales, su diámetro y separación se conservaron iguales al modelo experimental. Se modeló un pilote sometido a compresión cuya longitud total es 4,5 m y un pilote de 5,5 m sometido a tensión.

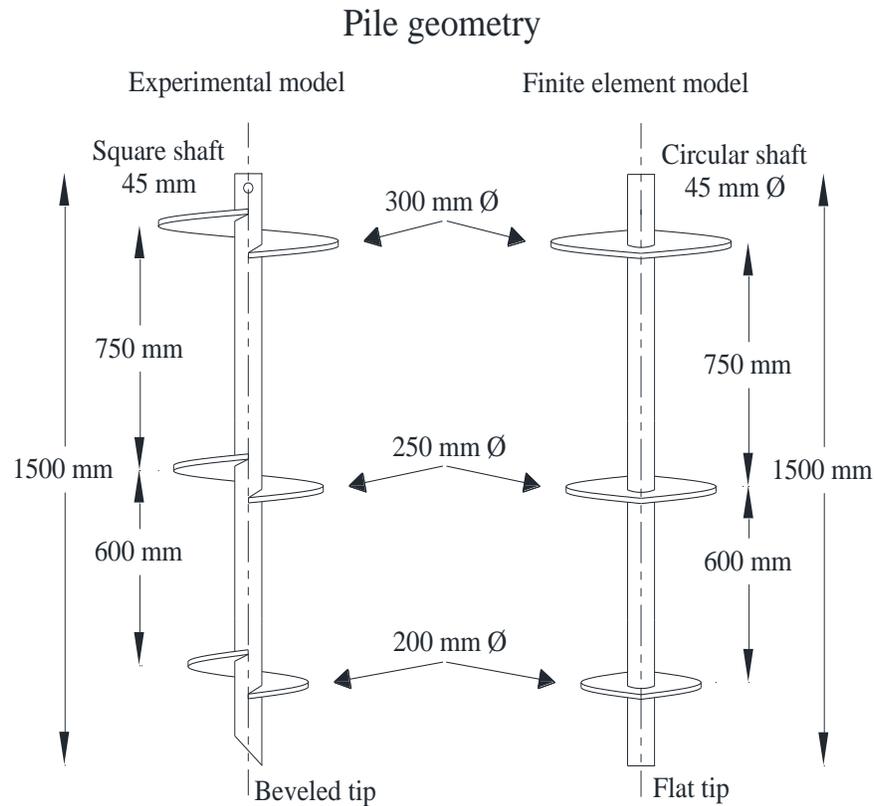


Figura 3-6 Geometría del pilote del modelo experimental de Livneh y El Naggar (2008) y el pilote modelado en Plaxis.

3.3.3 Criterio para la capacidad última del pilote

Las pruebas de carga experimentales y en especial los MEF no siempre muestra de manera explícita la capacidad máxima de un pilote, por lo cual, se hace necesario estimar dicha capacidad ultima a partir de la curva carga-desplazamiento que describe el comportamiento del pilote.

La curva carga- desplazamiento obtenida del MEF se puede dividir en tres zonas distintas como muestra la Figura 3-7: la zona inicial lineal que termina en L_i tiene un comportamiento elástico con pendiente pronunciada, la zona no lineal de transición entre L_i y L_f en donde el desplazamiento se considera desproporcional al incremento de carga, y por último la zona lineal final donde la pendiente no es tan pronunciada lo que indica poca rigidez y se presentan mayores desplazamientos ante pequeños incrementos de carga.

Teniendo en cuenta que un pilote alcanza su capacidad máxima cuando se presentan grandes desplazamientos en pequeños incrementos; Elkasabgy y El Naggar (2015) establecen que la capacidad ultima de un pilote se ubica en la zona no lineal de transición antes del inicio de la zona lineal final.

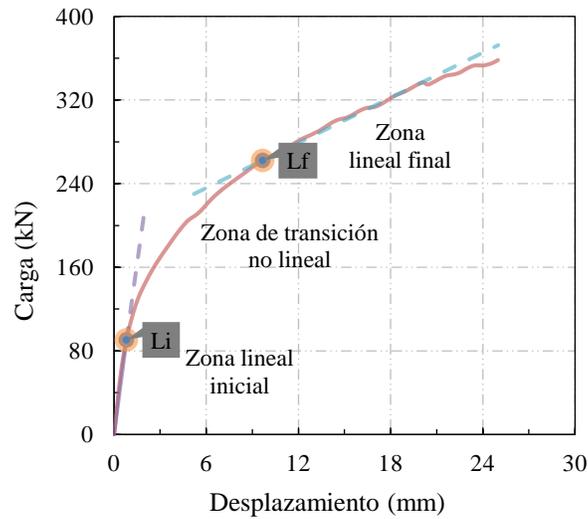


Figura 3-7 Curva típica de carga-desplazamiento para pilotes.

Otras investigaciones determinan la capacidad máxima de un pilote helicoidal considerando su geometría (tabla 3-4) y la forma de la curva de carga-desplazamiento. La mayoría de los autores coinciden en que el diámetro de las placas helicoidales es la dimensión característica de los pilotes helicoidales, por lo cual el criterio de desplazamiento máximo antes de producirse la falla esta dado por el diámetro de la placa helicoidal (D) y la deflexión elástica propia del pilote.

Criterio de falla	Desplazamiento de falla
Criterio FHWA (Rawat & Gupta 2017)	5%D
Criterio ISSMFE (ISSMFE 1985) y criterio BS-8004 (BSI 1986)	10%D
Criterio de Davisson (Davisson 1972)	$\frac{QL}{AE} + \frac{D}{120} + 4$
Criterio de Livneh & El Naggar (Livneh & El Naggar 2008)	$\frac{QL}{AE} + 0,08D$
Criterio Elkasabgy & El Naggar (Elkasabgy & El Naggar 2015)	$\frac{QL}{AE} + 0,035D$

Tabla 3-4 Criterios de falla para estimar la capacidad ultima de pilotes a compresión y tensión (adaptado de Livneh y El Naggar 2008).

En este estudio se adoptó el criterio de falla de Elkasabgy y El Naggar (2015); teniendo en cuenta que se desarrolló para pilotes helicoidales con geometría similar a la del MEF y además la carga ultima se ubica en la zona no lineal de transición. La carga última del pilote se establece como la carga necesaria para generar un desplazamiento total en la cabeza del pilote igual al 3,5% del diámetro de la mayor placa helicoidal más la deformación elástica del pilote. Al determinar los

desplazamientos en la punta; el criterio no requiere contemplar la deformación elástica del pilote.

3.4 Calibración del modelo

Utilizando los parámetros de ambos sitios y las curvas de carga-desplazamiento de los resultados experimentales de Livneh y El Naggar (2008) se calibro un MEF para compresión y uno para tensión.

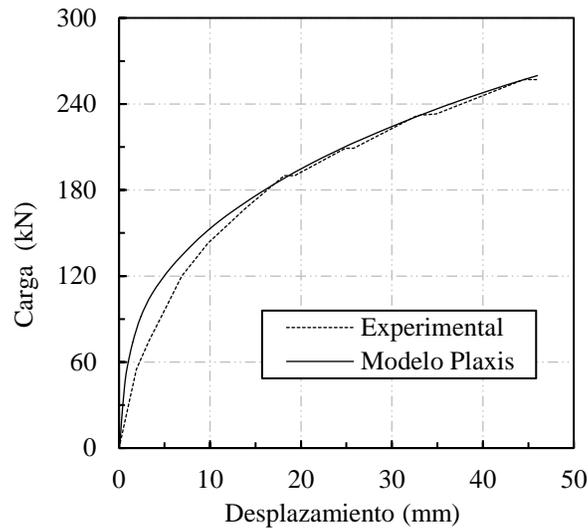
3.4.1 Caso 1: Pilote sometido a tensión en el sitio 1.

El pilote ubicado en el sitio 1 fue sometido a tensión de acuerdo con el estudio experimental, y tiene una longitud total de aproximadamente 5,5 metros. La curva carga-desplazamiento del MEF tiene un comportamiento similar a la curva del modelo experimental (Figura 3-8a). Inicialmente el suelo modelado tiene mayor resistencia que el suelo real debido en gran medida a los altos módulos de elasticidad establecidos, pero después de deformarse 13 mm empieza a comportarse de manera idéntica al suelo real del sitio 1. Teniendo en cuenta que las curvas presentan una tendencia similar, se determina que el MEF para el sitio 1, describe de manera satisfactoria el comportamiento real del suelo.

3.4.2 Caso 2: Pilote sometido a compresión en el sitio 2.

La placa helicoidal mayor del pilote se ubica a una profundidad de tres metros, teniendo aproximadamente 4,5 metros de longitud total. La figura 3-8b muestra que la curva carga-desplazamiento del MEF con los parámetros del sitio 2 coincide con la curva de los resultados del modelo experimental. La coincidencia de las curvas carga-desplazamiento indican que el modelo numérico permite describir de forma correcta el comportamiento a compresión del suelo real de sitio 2, aunque el MEF no presenta una falla explícita del suelo.

a) Pilote helicoidal sometido a tensión en el sitio 1.



b) Pilote helicoidal sometido a compresión en el sitio 2.

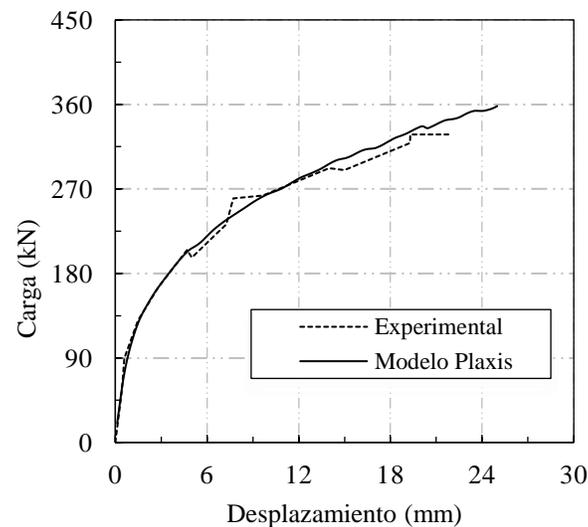


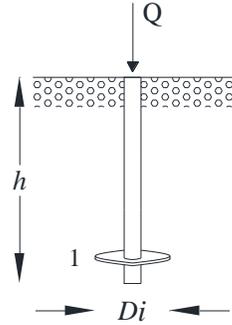
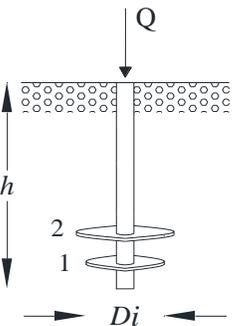
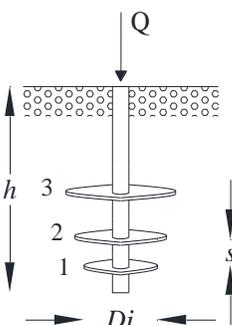
Figura 3-8 Valores de carga-desplazamiento del modelo experimental y del MEF

3.5 Análisis Paramétrico

Los MEF calibrados y validados se utilizaron para realizar un estudio paramétrico en donde las propiedades de los materiales se conservaron, mientras que la geometría del pilote se cambió con el fin de investigar el efecto que tienen diferentes parámetros en la capacidad a compresión y tensión de los pilotes helicoidales.

La realización del estudio paramétrico se llevó a cabo desarrollando 12 modelos del pilote sometido a tensión y 12 modelos del pilote sometido a compresión. Para determinar el efecto del número de placas helicoidales en la capacidad a tensión y compresión del pilote, se

consideraron pilotes de 1, 2, 3 y 4 hélices. Para el pilote de una sola hélice se usó el diámetro (D_i) de la primera hélice del modelo calibrado, es decir, 200 mm, el diámetro de las otras hélices está en función del diámetro inicial, incrementándose en factor de $0,25D_i$ al aumentar el número de las hélices del pilote. De esta forma las cuatro placas helicoidales del pilote de cuatro hélices tienen un diámetro de D_i , $1,25D_i$, $1,5D_i$ y $1,75D_i$. La tabla 3-5 muestra en síntesis las variaciones realizadas.

Configuración	Notación	Numero de hélices	# Hélice	D/D_i	s/D
	1H	1	1	1	-
	2H	2	1	1	3
			2	1.25	
	3H	3	1	1	3
			2	1.25	
			3	1.5	
	4H	4	1	1	3
			2	1.25	
			3	1.5	

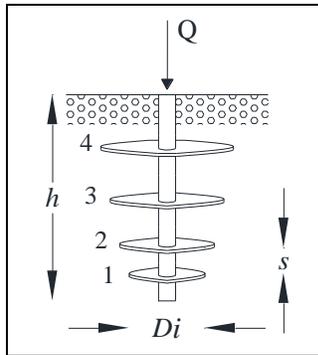
			4	1.75
---	--	--	---	------

Tabla 3-5 Configuración de los pilotes helicoidales para el análisis del efecto del número de hélices.

Para determinar el efecto del diámetro se utilizaron tres pilotes con placas de diámetro ascendente como el pilote del estudio experimental. El diámetro de las placas helicoidales se estableció en función de la razón D/D_i donde, D es el diámetro de cada placa helicoidal y D_i es el diámetro de la primera placa helicoidal del pilote del modelo experimental (200 mm). La tabla 3-6 muestra en síntesis las variaciones realizadas.

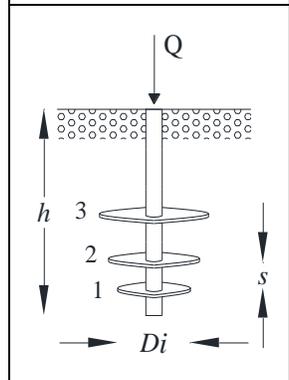
Configuración	Notación	# Hélice	D/D_i	s/D
	3H	1	0.75	3
		2	1	
		3	1.25	
		1	1	3
		2	1.25	
		3	1.5	
		1	1.25	3
		2	1.5	
		3	1.75	

Tabla 3-6 Configuración de los pilotes helicoidales para el análisis del efecto del diámetro.

El efecto de la separación de las placas helicoidales se investigó a partir de cuatro modelos de pilotes helicoidales de tres hélices y cuatro modelos de pilotes de cuatro hélices con separaciones (s/D) iguales a 2.5, 3, 3.5 y 4. Donde s es la separación y D es el diámetro de la placa helicoidal inferior. En la tabla 3-7 se muestra la síntesis de las variaciones realizadas para el pilote de tres hélices y de forma similar se realizaron para el pilote de cuatro hélices.

Configuración	Notación	# Hélice	D/D_i	s/D
	3H	1	1	2.5
		2	1.25	
		3	1.5	
		1	1	3
		2	1.25	
		3	1.5	

		1	1	3.5
		2	1.25	
		3	1.5	
		1	1	4
		2	1.25	
		3	1.5	

Tabla 3-7 Configuración de los pilotes helicoidales para el análisis del efecto de la separación.

Con cada uno de los MEF generados a partir de los cambios paramétricos, se corre el programa y se exportan los valores de carga y desplazamiento a hojas de trabajo en Excel. Los datos obtenidos de Plaxis 2D son convertidos al sistema de unidades utilizado; el desplazamiento en el software se genera en metros por lo cual se convierte a milímetros mientras que la carga que se extrae en radianes se convierte a kilo Newtons.

A partir de los valores de carga en kilo Newtons y desplazamiento en milímetros se generan las curvas de carga-desplazamiento que permiten estimar la capacidad de carga de cada pilote.

Para identificar con claridad la influencia que tienen cada parámetro variado en la capacidad de carga de los pilotes helicoidales, se graficaron las curvas de carga-desplazamiento de los pilotes con el mismo parámetro modificado en un solo plano que da origen a la presentación y discusión de los resultados.

Capítulo 4

4. Resultados y discusión

4.1 Efecto del número de placas helicoidales en la capacidad de carga

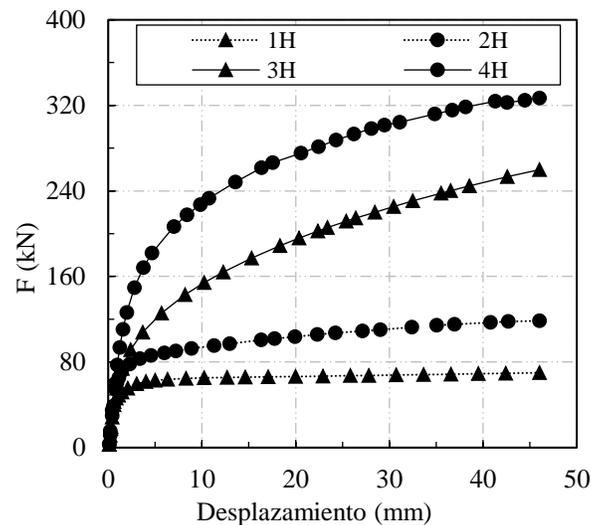
Los resultados obtenidos en los modelos muestran que la capacidad del pilote aumenta proporcionalmente con el número de hélices, como se muestra en la figura 4-1a y 4-1b, basándose en el criterio de falla en donde la carga última del pilote se establece igual al 3,5% del diámetro de la mayor placa helicoidal más la deformación elástica del pilote. Las cargas últimas obtenidas para el pilote sometido a compresión (figura 4-1b) son aproximadamente 99kN, 168kN, 267kN, y 360kN, siendo la mayor capacidad la del pilote con cuatro placas helicoidales. El pilote con dos hélices aumentó su capacidad 69% respecto al pilote con una hélice, mientras que el pilote con tres hélices aumentó su capacidad un 58%, al incrementar el número de hélices a cuatro se obtuvo un aumento de capacidad del 34%; como se puede apreciar el porcentaje de aumento de la capacidad disminuye en la medida en que aumenta el número de placas helicoidales similar a lo determinado por Rawat y Gupta (2017) que proponen que el uso de más de 4 placas helicoidales no es adecuado. Del mismo modo para el pilote sometido a tensión (figura 4-1a) las cargas últimas son aproximadamente 64kN, 92kN, 156kN y 240kN en donde el pilote con dos hélices aumentó su capacidad 43% en comparación con el pilote de una hélice, al usar tres hélices la capacidad aumentó 69%, y al incrementar el número de hélices a cuatro se obtuvo un aumento de capacidad del 53%.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Rawat y Gupta (2017) concluyendo que el aumento del número de las placas helicoidales incrementa la capacidad a extracción de los pilotes, puesto que además de aumentar el área de apoyo, el suelo entre las placas helicoidales se compacta aumentando el ángulo de fricción interna y por ende la capacidad portante. Elkasabgy y El Nagggar (2015) también establecieron que la instalación de solo una placa helicoidal aumenta la capacidad de un pilote en un 18% en comparación con la capacidad de un pilote hincado de las mismas características. Salem y Hussein (2017) determinaron que el número de placas helicoidales es el parámetro más eficaz para aumentar la capacidad de los pilotes atribuyendo este aumento al incremento del área de fricción superficial; su investigación

concluyo que el aumento del número de hélices de 2 a 5 genero un incremento en la capacidad a tensión del pilote helicoidal en casi un 86% similar a los resultados obtenidos en esta investigación.

Por otra parte, en contraste al presente estudio paramétrico, la investigación de Nabizadeh y Choobbasti (2017) propone que el número de hélices aumenta la perturbación del suelo afectando el desempeño de los pilotes helicoidales por lo cual concluyeron que el desempeño de pilotes helicoidales de tres hélices no es adecuado en comparación al obtenido con dos hélices. Pese a lo concluido por Nabizadeh y Choobbasti (2017) y teniendo en cuenta los resultados propios y de las otras investigaciones se puede establecer que incrementar el número de placas helicoidales aumenta de manera significativa la capacidad a extracción y compresión de un pilote helicoidal.

a) Variación de la capacidad máxima a extracción de pilotes helicoidales en función del número de las placas.



b) Variación de la capacidad máxima a compresión de pilotes helicoidales en función del número de las placas.

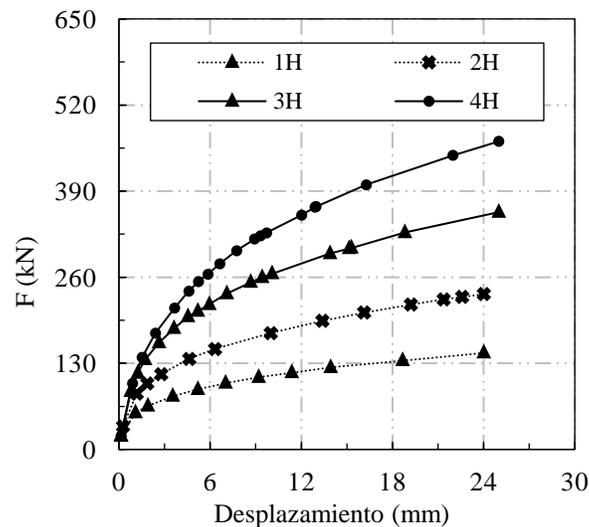


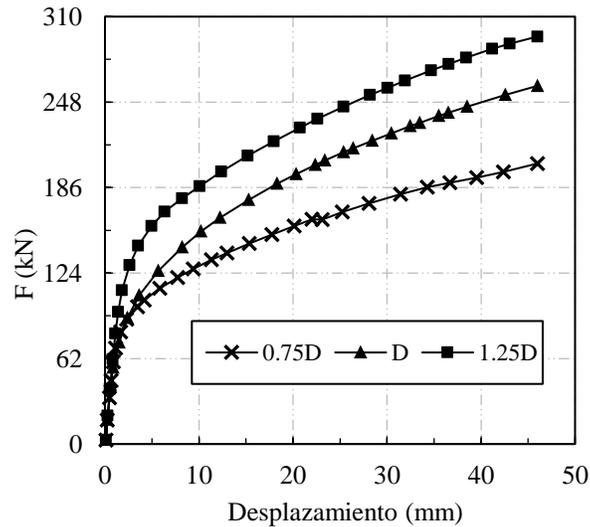
Figura 4-1 Curva cargas-desplazamiento obtenidas mediante MEF de pilotes helicoidales con diferente número de placas.

4.2 Efecto del diámetro de las placas helicoidales en la capacidad de carga

Manteniendo tres placas helicoidales y una separación entre placas constante, la variación del diámetro generó cambios en la capacidad a extracción y compresión del pilote helicoidal. La figura 4-2a y 4-2b muestran un incremento en la capacidad última del pilote en función del incremento del diámetro. Teniendo en cuenta el criterio de falla del pilote a extracción (figura 4-2a), se observa que aumentó su capacidad aproximadamente 24% cuando se incrementó su diámetro de $0.75D$ a $1D$, mientras que al incrementarlo de $1D$ a $1.25D$ su capacidad aumento 28%. De la misma manera la figura 4-2b muestra que la capacidad del pilote sometido a compresión aumentó cuando se incrementó el diámetro de las placas helicoidales, con lo cual, la capacidad fue de 205kN en el pilote con placas de diámetro $0.75D$ y se incrementó 28% en el pilote con placas de diámetro $1D$, mientras que aumento 27% para el pilote con placas de diámetro $1.25D$. Los resultados al igual que los obtenidos por Rawat y Gupta (2017) indican que la capacidad de los pilotes sometidos a extracción y compresión aumenta en función del diámetro de sus placas. Este incremento en la capacidad del pilote se esperaba teniendo en cuenta que aumentar el diámetro de las placas aumenta directamente el área de apoyo lo que introduce fricción entre el pilote y el suelo.

Debido a que el incremento de la capacidad no tiene un crecimiento lineal en función del diámetro de las placas helicoidales, aumentar el diámetro más allá de 1.25D no es efectivo en contraste con el incremento de trabajo necesario para instalarlo.

a) Variación de la capacidad máxima a extracción de pilotes helicoidales en función del diámetro de las placas.



b) Variación de la capacidad máxima a compresión de pilotes helicoidales en función del diámetro de las placas.

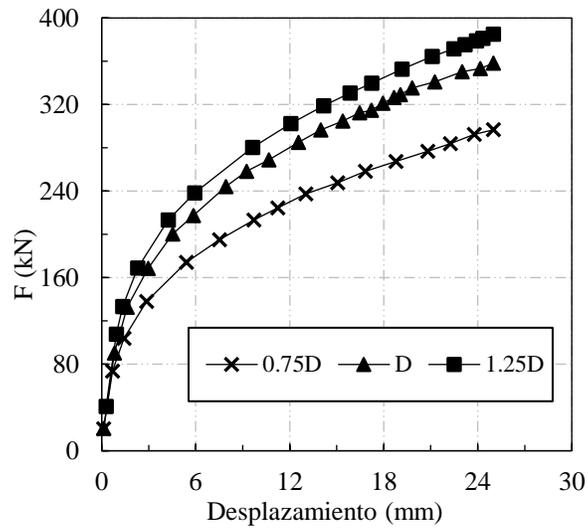


Figura 4-2 Curva cargas-desplazamiento obtenidas mediante MEF de pilotes helicoidales con diferentes diámetros.

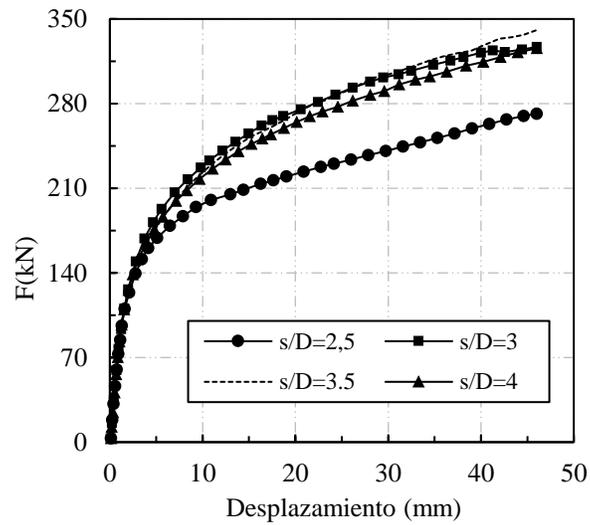
4.3 Efecto de la separación entre placas helicoidales en la capacidad de carga

La figura 4-3a y 4-3b muestra el cambio en la capacidad del pilote a extracción y compresión respectivamente; mientras que los demás parámetros se mantuvieron constantes se modificó la separación entre placas helicoidales para un pilote de 3 hélices en función de s/D . Los resultados permiten determinar en ambos casos que una separación $s/D < 3$ disminuye significativamente la capacidad del pilote helicoidal y a su vez una separación $s/D > 3$ no representa un incremento significativo en la capacidad, por lo cual, el uso convencional de una separación $s/D = 3$ es acertado; similar a lo encontrado por Salem y Hussein (2017) los cuales, establecieron que con una separación $s/D > 3$ este parámetro no tiene tanto efecto en la capacidad del pilote puesto que solo se presenta un ligero incremento.

Cuanto menor sea la separación, más cercano será el comportamiento de la falla al de un pilote con una sola hélice con lo cual su capacidad disminuye, esto se debe a que al modificar la separación cambia el tipo de falla generada en el suelo. El mecanismo de falla de los pilotes sometidos a extracción y compresión en función de su separación determinado en los MEF se muestra en la figura 4-4a y 4-4b respectivamente. Se determinó que con una separación $s/D < 3$ se genera una falla por cizallamiento cilíndrico mientras que con una separación $s/D \geq 3$ la falla generada es de placas individuales. Estos resultados coinciden con los encontrados por Rawat y Gupta (2017) y Stanier y otros (2022) que establecieron los mismos intervalos de separación para los dos tipos de falla, concluyendo que al generarse una falla de placas individuales el pilote alcanza mayor capacidad. En contraste, Rao y otros (1991) y Alwalan y Naggar (2020) establecieron el cambio de tipo de falla en diferentes intervalos de s/D ; encontraron que la falla por cizallamiento cilíndrico se presenta con una separación $s/D < 1.5$; mientras que la falla de placas individuales se genera con una separación $s/D > 1.5$.

Finalmente, los resultados propios y de otros autores indican que el mecanismo de falla asumido en el diseño de los pilotes helicoidales depende de la relación s/D , además con el fin de alcanzar una mayor capacidad es conveniente que se genere una falla de placas individuales.

a) Variación de la capacidad máxima a extracción de pilotes helicoidales en función de la separación entre placas.



b) Variación de la capacidad máxima a compresión de pilotes helicoidales en función de la separación entre placas.

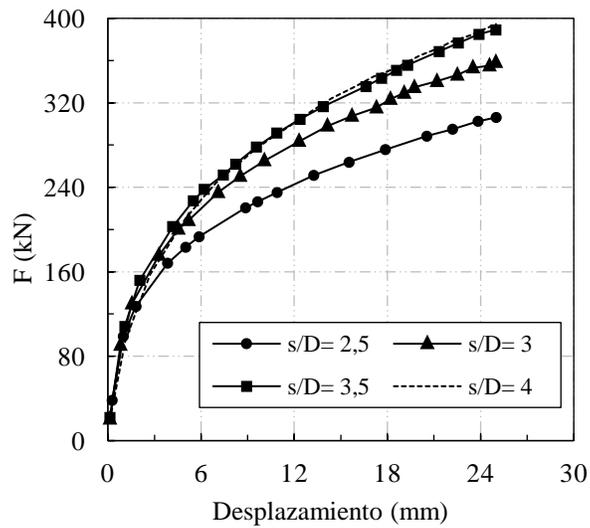
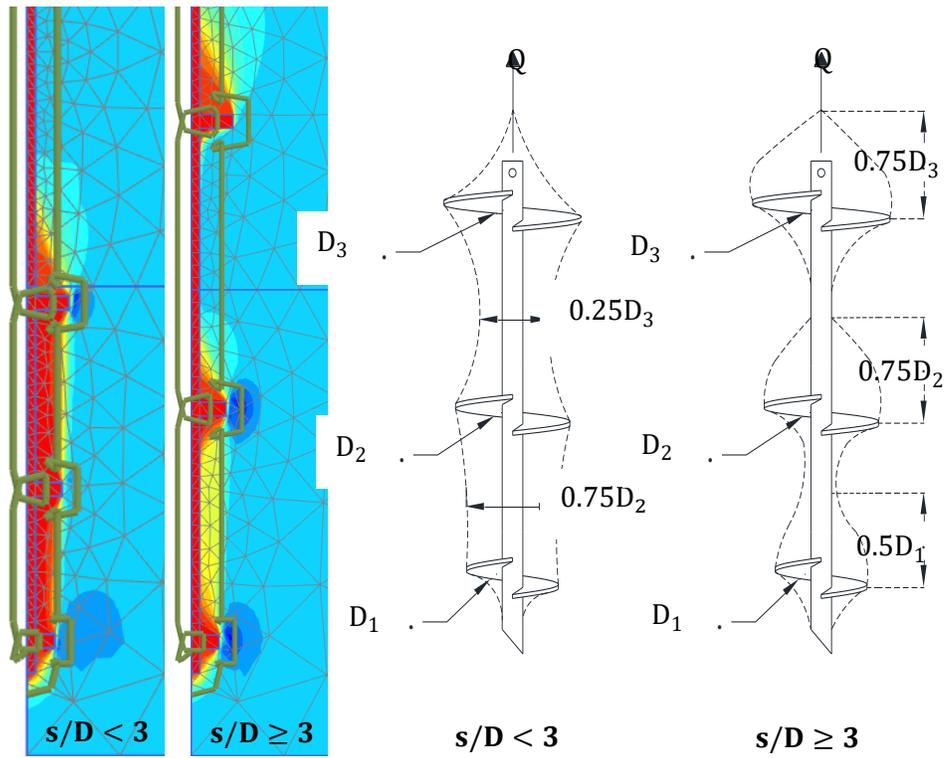


Figura 4-3 Curva cargas-desplazamiento obtenidas mediante MEF de pilotes helicoidales con diferente separación entre placas

a) Pilote sometido a extracción.



b) Pilote sometido a compresión.

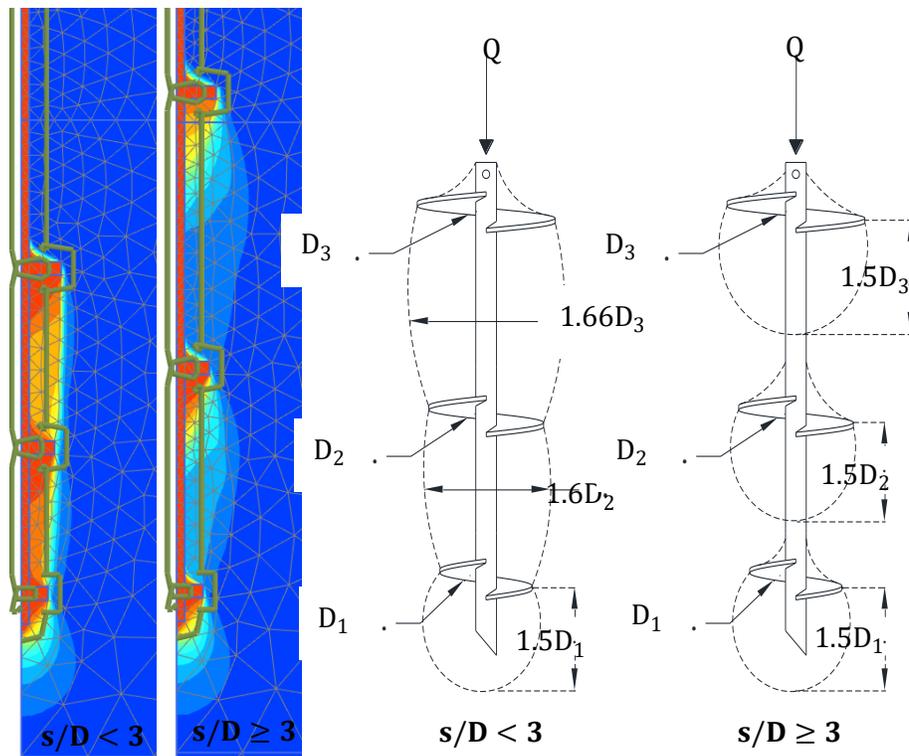


Figura 4-4 Mecanismo de falla para pilotes helicoidales a partir de los MEF.

Capítulo 5

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos del estudio paramétrico realizado en Plaxis 2D y teniendo en cuenta los resultados de otras investigaciones se generan las siguientes conclusiones:

- Emplear softwares como Plaxis 2D permite generar de forma adecuada modelos de elementos finitos que describan el comportamiento de un suelo real a partir de resultados experimentales; los modelos a su vez logran simular con éxito diferentes configuraciones geométricas en los pilotes, por lo cual son ideales para realizar estudios paramétricos en menor tiempo comparado con los estudios experimentales.
- Los MEF realizados no permiten determinar de manera explícita el momento de falla y por ende la capacidad última de los pilotes helicoidales, por lo cual es indispensable adoptar un criterio de falla adecuado de acuerdo con el tipo de suelo, la geometría de los pilotes y el comportamiento de la curva carga-desplazamiento.
- Incrementar el número de placas helicoidales en efecto representa un aumento en la capacidad última del pilote a extracción y compresión, aunque se debe tener en cuenta que el incremento del número de placas helicoidales implica un aumento en la torsión necesaria para instalar los pilotes.
- La capacidad de los pilotes helicoidales aumenta entre el 24% y el 28% al incrementar 0.25D el diámetro de sus placas helicoidales, este aumento de capacidad se debe a que el área que soporta la carga también se aumenta.
- El tipo de falla generado depende directamente de la separación entre las placas helicoidales, de esta manera, una separación $s/D < 3$ desarrolla una falla por cizallamiento cilíndrico mientras que con una separación $s/D \geq 3$ generada una falla de placas individuales; A su vez, la falla por cizallamiento cilíndrico disminuye la capacidad última del pilote a extracción y compresión en comparación con el desarrollo de una

falla de placas individuales. El uso de una separación $s/D = 3$ es idóneo puesto que una separación mayor no representa incrementos significativos en la capacidad del pilote.

- Esta investigación permite comprender la influencia que tienen los parámetros estudiados en la capacidad última de los pilotes helicoidales con el fin de contemplar su uso en nuevos proyectos de ingeniería.

5.2 Recomendaciones

La aceptación e implementación de diferentes alternativas de cimentación como los pilotes helicoidales, depende en gran medida del desarrollo de investigaciones al respecto que permitirán una mayor comprensión sobre su comportamiento y su capacidad de carga. Por lo anterior es indispensable fomentar las investigaciones al respecto. A continuación, se presentan algunas recomendaciones para futuras investigaciones.

- Es pertinente realizar investigaciones sobre el comportamiento y la capacidad de los pilotes helicoidales en diferentes tipos de suelo en donde se pueden incluir los suelos con nivel freático alto o totalmente sumergidos.
- Para la realización de investigaciones mediante modelos de elementos finitos es indispensable tener o realizar un estudio de suelos completo que permita determinar los parámetros de resistencia y deformación. Además, la confiabilidad de la investigación depende de la calibración de los modelos para lo cual se requieren resultados de pruebas experimentales que validen los resultados obtenidos.
- En el software Plaxis 2D en la pestaña de construcción por etapas, una vez se genera la etapa inicial y se activa el suelo con todos los parámetros, se debe crear una segunda etapa que reinicie los desplazamientos para posteriormente activar cargas en una tercera etapa, esto permite que los desplazamientos registrados correspondan únicamente a los generados por las cargas a las que se somete el pilote.
- El refinado de la malla del modelo permite obtener resultados más detallados, pero es importante segmentar el refinado en diferentes zonas, siendo más refinada la malla en la zona alrededor del pilote y más gruesa en las zonas más alejadas con el fin de minimizar el tiempo en el que Plaxis 2D realiza los cálculos. Estos son especialmente importantes cuando se está calibrando el modelo puesto que se requieren hacer pequeños cambios en la interacción de programa una y otra vez.

Bibliografía

- Aboshita, N. A. E., Salem, T. N., and Abdelatty, K. M. (2020). Modeling of Large Diameter Piles in Soil Formations Including Soft Clay. *Port-Said Engineering Research Journal*, 24(1), 44-53.
- Alwalan, M. F., and El Naggar, M. H. (2020). Finite element analysis of helical piles subjected to axial impact loading. *Computers and Geotechnics*, 123, 103597.
- Anfossi Canales, G. M. (Enero, 2019). Diseño de pilotes helicoidales para el soporte de la cimentación de una torre de alta tensión.
- ASTM. 1994. Standard test method for individual piles under static axial compressive load, D1143–81 (reapproved 1994). ASTM International, West Conshohocken, Pa.
- ASTM. 1995. Standard test method for individual piles under static axial tensile load, D3689–90 (reapproved 1995). ASTM International, West Conshohocken, Pa.
- Bentley Institute, Product Training Partner (s.f). Curso de modelización numérica con PLAXIS 2D.
- Brich Carlos (18 de Febrero del 2021). Allpa Ingeniería. Publicaciones. Parámetros para el calculo de la capacidad admisible. Disponible en: <https://www.allpaingenieria.com.pe/>.
- Brinkgreve, R. B. J., Al-Khoury, R., Bakker, K. J., Bonnier, P. G., Broere, W., Burd, H. J., ... & Den Haag, D. O. C. (2004). Versión 8 Manual de Referencia.
- Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., Swolfs, W. M., Waterman, D., Chesaru, A., & Bonnier, P. G. (2016). PLAXIS 2016. PLAXIS bv, the Netherlands.
- Camargo, G., & Gonzales, E. (2011). Modelamiento de problemas de estructuras de contención lateral mediante de programa de elementos finitos.
- Chui, M. (2013). Estudio de pruebas del laboratorio de Mecánica de Suelos (Tesis de Licenciatura). Universidad Veracruzana, Coatzacoalcos, Ver. México.
- Cubillos, Alfonso (s.f). Introduccion al método de los elementos finitos. Universidad de Ibague. Programa de Ing. Mecanica. Disponible en: <https://almec.files.wordpress.com/2007/10/resumen.pdf>.
- Das, B. M. (2012). Fundamentos de ingeniería de cimentaciones-séptima edición. Cengage learning.

- Elkasabgy, M., and El Naggar, M. H. (2015). Axial compressive response of large-capacity helical and driven steel piles in cohesive soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(2), 224-243.
- Elsherbiny, Z. H., and El Naggar, M. H. (2013). Axial compressive capacity of helical piles from field tests and numerical study. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(12), 1191-1203.
- Fatnanta, F., and Satibi, S. (2018, March). Bearing capacity of helical pile foundation in peat soil from different, diameter and spacing of helical plates. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 316, No. 1, p. 012035). IOP Publishing.
- Gavin, K., Doherty, P., and Tolooiyan, A. (2014). Field investigation of the axial resistance of helical piles in dense sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(11), 1343-1354.
- George, B. E., Banerjee, S., and Gandhi, S. R. (2020). Numerical analysis of helical piles in cohesionless soil. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 14(4), 361-375.
- Gerdau Corsa (2019). Cimentación con pilotes de acero. Obtenido de: <https://www.gerdaucorsa.com.mx/articulos/cimentacion-para-estructuras-de-acero>.
- Gomez, G. Miguel A. (s.f) Ensayos de validación mecánica. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/10682/Validaci%C3%B3_mec%C3%A0nica.pdf?sequence=5&isAllowed=y.
- Habitissimo (s.f.). Pisos de madera sobre pilotes. Obtenido de: <https://www.habitissimo.cl/presupuesto/san-antonio/algarrobo/piso-de-madera-sobre-pilotes>.
- Hanna, A. M., and Nguyen, T. Q. (2002). An axisymmetric model for ultimate capacity of a single pile in sand. *Soils and foundations*, 42(2), 47-58.
- Hernandez, Hatyiy. Construcción de cimentación profundas. [en línea]. Enero 2013. Obtenido de: <https://sites.google.com/site/construyetuingenio2013/construccion-decimentaciones-profundas/descripcion-de-los-metodos-de-construccion>.
- Kairope, (2014). Slideshare. Capacidad portante de suelos. Obtenido de: <https://es.slideshare.net/kairope/capacidad-portante-de-suelos>.
- Lanyi-Bennett, S. A., and Deng, L. (2019). Effects of inter-helix spacing and short-term soil setup on the behaviour of axially loaded helical piles in cohesive soil. *Soils and Foundations*, 59(2), 337-350.
- Li, W., and Deng, L. (2019). Axial load tests and numerical modeling of single-helix piles in cohesive and cohesionless soils. *Acta Geotechnica*, 14(2), 461-475.

- Liao, S. T., Tong, J. H., Chen, C. H., and Wu, T. T. (2006). Numerical simulation and experimental study of parallel seismic test for piles. *International Journal of Solids and Structures*, 43(7-8), 2279-2298.
- Livneh, B., and El Naggar, M. H. (2008). Axial testing and numerical modeling of square shaft helical piles under compressive and tensile loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(8), 1142-1155.
- Nabizadeh, F., and Choobbasti, A. J. (2017). The performance of grouted and un-grouted helical piles in sand. *International Journal of Geotechnical Engineering*.
- Martínez Díaz, A. E. (2017). Guía para hincado a presión de pilotes prefabricados de concreto reforzado en cimentación profunda, con base en reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR 10).
- Meyerhof, G.G., and Adams, J.I. 1968. The ultimate uplift capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, 5(4): 225–244. doi:10.1139/t68-024.
- Moreno, A. (2016). Fichas fundación MUSAAT. Cimentaciones profundas: Pilotes. ISSN: 2340-7573 Data: 13/4 Ord.: 3 Vol.: C N°: Cp-1 Ver.: 1
- Müller Fernández, L. (2014). Metodología para el Diseño de Pilotes Helicoidales para las Condiciones Cubanas (Doctoral dissertation, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas).
- Polishchuk, A. I., and Maksimov, F. A. (2017, November). Numerical analysis of helical pile–soil interaction under compressive loads. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 262, No. 1, p. 012099). IOP Publishing.
- Portella, I. 2007. Estudo teórico-experimental da capacidade de carga à tração e compressão de estacas metálicas helicoidais. Universidade Federal De Minas Gerais – UFMG.
- Rao SN, Prasad YVSN, Shetty MD (1991). The behaviour of model screw piles in cohesive soils. *Soils and Foundations* 1991;31(2):35e50.
- Rawat, S., and Gupta, A. K. (2017). Numerical modelling of pullout of helical soil nail. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(4), 648-658.
- Sakr, M. (2013). Comparison between high strain dynamic and static load tests of helical piles in cohesive soils. *Soil Dynamics and earthquake engineering*, 54, 20-30.
- Salem, T. N., and Hussein, M. (2017). Axial tensile capacity of helical piles from field tests and numerical study. *Port-Said Engineering Research Journal*, 21(2), 111-119.
- Spagnoli, G., and de Hollanda Cavalcanti Tsuha, C. (2020, September). Review of torque models for offshore helical piles. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 205, p. 12007).

- Stanier, S. A., Black, J. A., & Hird, C. C. (2014). Modelling helical screw piles in soft clay and design implications. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 167(5), 447-460.
- Structuralia (20 de enero 2021). Construcción de cimentaciones en puentes. Obtenido de: <https://blog.structuralia.com/construccion-de-cimentaciones-en-puentes>.
- Tectonica. (s.f). Pilotes helicoidales de acero. Cimentaciones. Obtenido de: <https://tectonica.archi/materials/pilotes-helicoidales-de-acero/>.
- TMG Drilling Supplies (s.f). Pilotes helicoidales. Sistema de soporte estructural, con pilotes helicoidales, para cimentación. Obtenido de: <https://tmggeotech.com/sistema-soporte-pilotes-helicoidales-cimentaciones>.
- Tsuha, C. D. H. C., Aoki, N., Rault, G., Thorel, L., and Garnier, J. (2012). Evaluation of the efficiencies of helical anchor plates in sand by centrifuge model tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(9), 1102-1114.
- Salas, Oscar V. (diciembre del 2011). Métodos y materiales. Volumen 1. Ensayos triaxiales para suelos.
- YEPES, V. (2020). Procedimientos de construcción de cimentaciones y estructuras de contención. Colección Manual de Referencia, 2ª edición. Editorial Universitat Politècnica de València, 480 pp. Ref. 328. ISBN: 978-84-9048-903-1.
- Zhang, D. J. Y., Chalaturnyk, R., Robertson, P. K., Segoo, D. C., and Cyre, G. (1998). Screw anchor test program (Part I): Instrumentation, site characterization and installation. In Proc. 51st Canadian Geotech. Conf., Edmonton.