



Neiva, 16 de mayo de 2022

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Goretty Alexandra González Peña, con C.C. No. 1075322772,

María Lucía Olarte Peña, con C.C. No. 1003812319,

Autor(es) de la tesis titulado Evaluación De La Rigidez En La Punta De Pilotes Sometidos A Diferentes Niveles De Confinamiento Mediante Un Modelo Numérico De Elementos Finitos Calibrado.

presentado y aprobado en el año 2022 como requisito para optar al título de Ingeniera 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: Goretty Alexandra González Peña.

Firma: Goretty González Peña.

AUTOR/ESTUDIANTE: María Lucía Olarte Peña.

Firma: María Lucía Olarte P.



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Evaluación De La Rigidez En La Punta De Pilotes Sometidos A Diferentes Niveles De Confinamiento Mediante Un Modelo Numérico De Elementos Finitos Calibrado.

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
González Peña	Goretty Alexandra
Olarte Peña	Maria Lucia

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

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

ASESOR (ES):

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

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniera Civil

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería civil

CIUDAD: Neiva **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2022 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 78

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):



Diagramas X Fotografías X Grabaciones en discos ___ Ilustraciones en general X
Grabados ___ Láminas ___ Litografías ___ Mapas ___ Música impresa ___ Planos ___
Retratos ___ Sin ilustraciones ___ Tablas o Cuadros X

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: Microsoft Word

MATERIAL ANEXO:

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

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Modelación numérica	Numerical modeling	6. Desplazamiento	Displacement
2. Modelación experimental	Experimental modeling		
3. Rigidez	Stiffness		
4. Sobrecarga	Overload		
5. Pilotes	Piles		

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Las cimentaciones profundas son utilizadas en presencia de suelos caracterizados por ser débiles, expansivos o colapsables; este tipo de cimentación es empleado para garantizar seguridad y estabilidad a las estructuras a lo largo del tiempo, permitiendo que se transmitan las cargas a los estratos más resistentes. El comportamiento de la rigidez de los pilotes y los cambios que estos pueden sufrir al ser sometidos a ciclos de carga y descarga, requiere de un entendimiento adecuado, para garantizar la estabilidad de las estructuras a lo largo del tiempo. En el presente trabajo de investigación, se realizó la calibración de un modelo numérico representado por un pilote bajo carga axial sometido a diferentes ciclos de carga y descarga, con una variación de 4 casos de confinamiento en el suelo. Se consideraron pruebas de laboratorio sobre pilotes en un modelo físico a gran escala, y se emplearon los datos registrados en las pruebas experimentales para la calibración de un modelo en elementos finitos (MEF), evaluando la relación entre la rigidez del suelo y el desplazamiento ante ciclos de carga y descarga. El análisis mostró que la



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	3 de 4
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

rigidez del suelo cuando el pilote está sometido a ciclos de carga-descarga, tiende a decrecer a medida que las deformaciones aumentan, dando como resultado un comportamiento logarítmico descendente. Así mismo, cuando el confinamiento es grande, los desplazamientos del pilote tienen un valor significativamente menor, comparados con confinamientos más pequeños.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

Deep foundations are used in the presence of weak, expansive or collapsible soils; this type of foundation is used to guarantee safety and stability to structures over time, allowing loads to be transmitted to the most resistant strata. The stiffness behavior of piles and the changes they may undergo when subjected to loading and unloading cycles, requires a proper understanding, in order to guarantee the stability of structures over time. In the present research work, the calibration of a numerical model represented by a pile under axial load subjected to different loading and unloading cycles, with a variation of 4 cases of soil confinement, was carried out. Laboratory tests on piles in a large-scale physical model were considered, and the data recorded in the experimental tests were used for the calibration of a finite element model (FEM), evaluating the relationship between soil stiffness and displacement under loading and unloading cycles. The analysis showed that the soil stiffness when the pile is subjected to load-unload cycles tends to decrease as the deformations increase, resulting in a decreasing exponential behavior. Likewise, when the confinement is large, the pile displacements have a significantly lower value compared to smaller confinements.

APROBACION DE LA TESIS



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	4 de 4
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

Nombre Presidente Jurado: Jackson Andrés Gil Hernández

Firma:

Nombre Jurado: Jaime Izquierdo Bautista

Firma:

Nombre Jurado: Juan Sebastián Peralta Ocampo

Firma:



**EVALUACIÓN DE LA RIGIDEZ EN LA PUNTA DE
PILOTES SOMETIDOS A DIFERENTES NIVELES
DE CONFINAMIENTO MEDIANTE UN MODELO
NUMÉRICO DE ELEMENTOS FINITOS CALIBRADO.**

Goretty Alexandra González Peña

María Lucia Olarte Peña

Universidad Surcolombiana

Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil

Neiva, Colombia

2022

**EVALUACIÓN DE LA RIGIDEZ EN LA PUNTA DE
PILOTES SOMETIDOS A DIFERENTES NIVELES
DE CONFINAMIENTO MEDIANTE UN MODELO
NUMÉRICO DE ELEMENTOS FINITOS CALIBRADO.**

Goretty Alexandra González Peña

María Lucia Olarte Peña

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

Ingeniero(a) Civil

Director (a):

M.Sc. Jackson Andrés Gil Hernández

Línea de Investigación:

Geotecnia – Cimentaciones profundas (Pilotes)

Universidad Surcolombiana

Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil

Neiva, Colombia

2022

(Dedicatoria o lema)

Todos los triunfos nacen cuando nos atrevemos a comenzar.

Eugene Ware.

Agradecimientos

Agradecemos a nuestros padres y hermanas, pilares fundamentales de nuestras vidas. Su compañía y apoyo incondicional nos han permitido llegar hasta aquí. Gracias por confiar en nosotras, por siempre tener el consejo adecuado, por caminar a nuestro lado y nunca dejarnos caer.

A nuestra abuela Albina Santofimio Flor, que con su sabiduría, consejos y amor nos enseñó lecciones vitales para la vida y nos encaminó siempre por el buen camino. Gracias por ser nuestro ejemplo a seguir, y por llevarnos siempre en sus oraciones.

Al ingeniero Jackson Andrés Gil, nuestro director de tesis porque gracias a su guía, conocimiento y apoyo pudimos realizar el presente trabajo de grado.

A nuestros compañeros y amigos de carrera, quienes nos acompañaron y compartieron sus conocimientos y a todas aquellas personas que durante estos cinco años estuvieron a nuestro lado apoyándonos y lograron que este sueño se haga realidad.

Muchas gracias a todos.

Resumen

Las cimentaciones profundas son utilizadas en presencia de suelos caracterizados por ser débiles, expansivos o colapsables; este tipo de cimentación es empleado para garantizar seguridad y estabilidad a las estructuras a lo largo del tiempo, permitiendo que se transmitan las cargas a los estratos más resistentes. El comportamiento de la rigidez de los pilotes y los cambios que estos pueden sufrir al ser sometidos a ciclos de carga y descarga, requiere de un entendimiento adecuado, para garantizar la estabilidad de las estructuras a lo largo del tiempo. En el presente trabajo de investigación, se realizó la calibración un modelo numérico representado por un pilote bajo carga axial sometido a diferentes ciclos de carga y descarga, con una variación de 4 casos de confinamiento en el suelo. Se consideraron pruebas de laboratorio sobre pilotes en un modelo físico a gran escala, y se emplearon los datos registrados en las pruebas experimentales para la calibración de un modelo en elementos finitos (MEF), evaluando la relación entre la rigidez del suelo y el desplazamiento ante ciclos de carga y descarga. El análisis mostró que la rigidez del suelo cuando el pilote está sometido a ciclos de carga-descarga, tiende a decrecer a medida que las deformaciones aumentan, dando como resultado un comportamiento exponencial descendente. Así mismo, cuando el confinamiento es grande, los desplazamientos del pilote tienen un valor significativamente menor, comparados con confinamientos más pequeños.

Palabras clave: Modelación numérica, modelación experimental, rigidez, sobrecarga, pilotes, desplazamiento.

Abstract

Deep foundations are used in the presence of weak, expansive or collapsible soils; this type of foundation is used to guarantee safety and stability to structures over time, allowing loads to be transmitted to the most resistant strata. The stiffness behavior of piles and the changes they may undergo when subjected to loading and unloading cycles, requires a proper understanding, in order to guarantee the stability of structures over time. In the present research work, the calibration of a numerical model represented by a pile under axial load subjected to different loading and unloading cycles, with a variation of 4 cases of soil confinement, was carried out. Laboratory tests on piles in a large-scale physical model were considered, and the data recorded in the experimental tests were used for the calibration of a finite element model (FEM), evaluating the relationship between soil stiffness and displacement under loading and unloading cycles. The analysis showed that the soil stiffness when the pile is subjected to load-unload cycles tends to decrease as the deformations increase, resulting in a decreasing exponential behavior. Likewise, when the confinement is large, the pile displacements have a significantly lower value compared to smaller confinements.

Keywords: Numerical modeling, experimental modeling, stiffness, overload, piles, displacement.

Contenido

Resumen	VIII
Capítulo 1	16
1. Introducción	16
1.1 Antecedentes	17
1.2 Justificación	22
1.3 Objetivos	23
1.3.1 Objetivo General	23
1.3.2 Objetivos Específicos	24
1.4 Estructura del documento	24
Capítulo 2	26
2. Marco teórico	26
2.1.1 Pilotes	26
2.1.2 Calculo de pilotes - Pruebas de carga	28
2.1.3 Resistencia en punta de pilotes	30
2.1.4 Rigidez en el Suelo	32
2.1.5 Método elementos finitos	33
2.1.6 Modelo constitutivo Hardening Soil	37
2.1.7 Plaxis 2D	38
Capítulo 3	40
3. Metodología	40
3.1 Procedimiento pruebas de laboratorio	41
3.1.1 Montaje del aparato experimental	41

3.1.2	Procedimiento de prueba	46
3.2	Caracterización de Materiales	48
3.3	Modelación y Calibración del Modelo Numérico	49
3.3.1	Modelación Numérica.....	49
3.3.2	Calibración del Modelo Numérico	53
3.4	Análisis Paramétrico.....	54
3.4.1	Caso 1 –Pilote con confinamiento de 10 PSI	56
3.4.2	Caso 2 –Pilote con confinamiento de 20 PSI	59
3.4.3	Caso 3 –Pilote con confinamiento de 30 PSI	61
3.4.4	Caso 4 –Pilote con confinamiento de 40 PSI	64
Capítulo 4	68
4.	Análisis de Resultados	68
Capítulo 5	73
5.	Conclusiones	73
BIBLIOGRAFÍA	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Condiciones para el uso de cimentaciones profundas. Tomado de (Das, 2012)	27
Figura 2-2 Representación tipos de pilote tomado de SkyCiv (2022)	27
Figura 2-3 Proceso discretización. Tomado de Cortinez & Girón (2012)	34
Figura 2-4 Esquema malla axisimétrica elementos finitos. Tomada de Diaz (2013)	35
Figura 2-5 Espacio geométrico tomado de Ingeniería y Mecánica automotriz (2020)	36
Figura 3-1 Representación gráfica de la metodología empleada para el desarrollo de la presente investigación.	41
Figura 3-2 Configuración del aparato experimental utilizado en el estudio de laboratorio. Tomada de Wallace (2019).	42
Figura 3-3 Configuración del marco de reacción, donde se evidencia la riostra transversal, celda de carga y gato hidráulico. Tomada de Wallace (2019).	43
Figura 3-4 Jaula de armadura con tubos de PVC, varillas de refuerzo y calibradores de tensión. Tomada de Wallace (2019).	44
Figura 3-5 Vista superior del modelo de cimentación de pozo perforado antes de ser fundido mostrando las ubicaciones de los calibradores de tensión. Tomada de Wallace (2019).	45
Figura 3-6 Modelo final del pilote utilizado durante la prueba de laboratorio. Tomada de Wallace (2019).	46
Figura 3-7 Prueba de carga típica que muestra la trayectoria de carga, descarga y recarga. Tomada de Wallace (2019).	47
Figura 3-8 Lata de densidad empleada para determinar la densidad final de la arena limpia mal gradada. Tomada de Wallace (2019).	48
Figura 3-9 Representación gráfica de las dimensiones del pilote modelado en Plaxis 2D.	50

Figura 3-10 Representación gráfica de las mallas empleadas para la modelación del pilote en Plaxis 2D.	51
Figura 3-11 Representación gráfica del Modelo suelo-pilote empleado en la investigación.	52
Figura 3-12 Curva fuerza-desplazamiento del modelo numérico VS curva fuerza-desplazamiento prueba de laboratorio.	54
Figura 3-13 Diagrama de flujo análisis paramétrico	55
Figura 3-14 Curva fuerza-desplazamiento del modelo numérico y los diferentes ciclos de carga realizados con confinamiento de 10 PSI	57
Figura 3-15 Rigidez de los diferentes ciclos de carga vs. Desplazamiento en la punta del pilote caso No. 1	58
Figura 3-16 Curva fuerza-desplazamiento del modelo numérico y los diferentes ciclos de carga realizados con confinamiento de 20 PSI	60
Figura 3-17 Rigidez de los diferentes ciclos de carga vs. Desplazamiento en la punta del pilote caso No. 2	61
Figura 3-18 Curva fuerza-desplazamiento del modelo numérico y los diferentes ciclos de carga realizados con confinamiento de 30 PSI	63
Figura 3-19 Rigidez de los diferentes ciclos de carga vs. Desplazamiento en la punta del pilote caso No. 3	64
Figura 3-20 Curva fuerza-desplazamiento del modelo numérico y los diferentes ciclos de carga realizados con confinamiento de 40 PSI	66
Figura 3-21 Rigidez de los diferentes ciclos de carga vs. Desplazamiento en la punta del pilote caso No. 4	67
Figura 4-1 Variación de la rigidez vs. Desplazamiento. a). Confinamiento 10 PSI; b). Confinamiento 20 PSI; c). Confinamiento 30 PSI; d). Confinamiento 40 PSI.	70
Figura 4-2 Rigidez en la punta del pilote con diferentes sobrecargas de confinamiento.	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1 Parámetros del modelo Harding Soil. Tomado de Plaxis (2004).	38
Tabla 3-1 Propiedades mecánicas del pilote en concreto reforzado empleado para el modelo numérico.	50
Tabla 3-2 Propiedades del suelo empleadas para la modelación numérica.....	53
Tabla 3-3 Casos de estudio analizados en el modelo numérico.	55
Tabla 3-4 Variación ciclos de carga caso No. 1.....	56
Tabla 3-5 Variación ciclos de carga caso No. 2.....	59
Tabla 3-6 Variación ciclos de carga caso No. 3.....	62
Tabla 3-7 Variación ciclos de carga caso No. 4.....	65

Capítulo 1

1. Introducción

La cimentación es la parte estructural de la edificación encargada de transmitir las cargas al suelo, regularmente se eligen dependiendo del tipo de construcción, tipo de terreno y el tipo de material que se tenga en la zona. (Arqzon, 2021).

El pilote o sistema por pilotaje, es un tipo de cimentación profunda de tipo puntual, que se hinca en el terreno buscando siempre el estrato resistente capaz de soportar las cargas transmitidas. Los pilotes transmiten al terreno las cargas que reciben de la estructura por medio de una combinación de rozamiento lateral o resistencia por fuste; y resistencia a la penetración o resistencia por punta. Pueden estar contruidos con concreto armado ordinario, con concreto pretensados similares a postes de luz, con secciones metálicas o con madera (Arqzon, 2021). La mejor manera de saber si un pilote es capaz de soportar la carga requerida, es ejecutar un ensayo de carga. Este ensayo también puede utilizarse para medir las características de fuerza-desplazamiento del pilote (Hurtado, Cimentaciones Profundas, 2011).

En algunas circunstancias, las cimentaciones pueden estar sometidas a ciclos de carga-descarga como en el caso de los puentes o en cimentaciones que soportan carga dinámica de maquinaria. Para este tipo de construcciones, el diseño de la cimentación debe considerar aparte de las cargas estáticas, las fuerzas dinámicas que se ocasionarán por la operación de la máquina y momentos dinámicos desbalanceados (Carrera, 2021). Este tipo de cimentación puede generar variaciones en la rigidez del suelo, afectando así el comportamiento de la estructura. Es por ello, por lo que la rigidez debe ser evaluada, ya que esta es una propiedad del suelo importante que representa la medida cualitativa de la resistencia a las deformaciones elásticas producidas por un material, contemplando la capacidad de un elemento estructural para soportar cargas o esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones. Normalmente, la rigidez se calcula como la razón entre una fuerza aplicada y el desplazamiento obtenido por la aplicación de esa fuerza (Javier, 2015).

Debido a las limitaciones de información de campo sobre el comportamiento de pilotes, y las dificultades para representar pruebas de laboratorio a gran escala, en los últimos años el uso de modelos numéricos se ha convertido en una herramienta primordial en la caracterización del estado fuerza-desplazamiento de diversos problemas de ingeniería. Cuando empleamos métodos numéricos en la solución de diversos problemas de ingeniería, la solución que se obtiene es aproximada, y para que un modelo numérico presente cierto grado de fiabilidad, debe ser sometido a un proceso de calibración numérica, la cual suele separarse en dos procesos de calibración, la matemática y la física (Mesa & J, 2011).

A pesar, de que este sistema de cimentación profunda es implementado a menudo en diferentes tipos de construcciones, falta claridad sobre el comportamiento de la rigidez de los pilotes, cuando estos se encuentran sometidos a ciclos de carga-descarga ante diferentes niveles de confinamiento. Es por esto, que el presente trabajo evalúa el comportamiento de un pilote sometido a distintos ciclos de carga, descarga y recarga axial, con diferentes casos de sobrecarga aplicada al suelo, con el fin de identificar la relación que existe entre la rigidez del suelo y el desplazamiento en la punta del pilote, para ello, se realizara un modelo numérico que estará sujeto a las restricciones del programa Plaxis 2D empleando los resultados de la tesis guía “Axial load transfer in large-scale Physical Model Drilled Shaft Foundations”.

1.1 Antecedentes

En el área de la construcción de obras civiles, el diseño de la cimentación es un procedimiento de gran relevancia que garantiza la estabilidad y la seguridad del proyecto. En los últimos años, diferentes autores han investigado el comportamiento de pilotes sometidos a cargas axiales, y la distribución de los esfuerzos en el tiempo.

Paniagua e Ibarra (2012) realizaron dos pruebas de carga estática, de compresión axial, en pilotes de concreto hincados. Las pruebas de carga, se llevaron a cabo para simular las condiciones de carga-tiempo bajo las cuales trabajarán los pilotes, a una carga máxima programada de hasta 150 t. El procedimiento utilizado fue el de carga controlada; la cual

permitió definir la carga última que soportaba el pilote, aplicando la carga en incrementos pequeños, y en incrementos de carga iguales, cuando la velocidad de asentamiento se reducía a un valor mínimo, de 250 micras/hora. Para la primera prueba, el pilote ensayado bajo carga axial falló antes de alcanzar la carga máxima (150t), llegando hasta una carga máxima del sistema pilote-suelo de 125 t, asociada a un desplazamiento de 21 mm. A partir de la gráfica fuerza-desplazamiento, los resultados mostraron que la capacidad por fricción del suelo al fuste del pilote fue de 97 t con una rigidez del sistema de $KA=12,82$ t/m. Así mismo, los autores obtuvieron que la capacidad por punta del pilote fue de 28 t con una rigidez en la punta de $KP=5,2$ t/m.

En la segunda prueba, la carga se aplicó en dos ciclos, el primero hasta el 50% de la carga máxima, y el segundo hasta la carga total. Los incrementos de carga fueron del 12.5% de la carga máxima, y los de descarga del 25%. Este pilote también falló antes de alcanzar la carga máxima prevista, alcanzando el sistema pilote-suelo una carga máxima de 80 t, asociada a un desplazamiento de 26 mm. Los resultados presentados en la gráfica carga-desplazamiento, mostraron que la capacidad por adherencia del suelo al fuste del pilote fue de 58 t; con un valor de rigidez del sistema de $KA=3,635$ t/m, mientras que la capacidad por punta del pilote fue de 22 t, presentando el trabajo de la punta una rigidez de $KP=2,194$ t/m (Paniagua & Ibarra, 2012).

Dias y Bezuijen (2018) realizaron una investigación, en la cual implementaban un método de transferencia de carga para pilotes bajo carga y descarga axial; los autores emplearon las pruebas de campo realizadas en Taiwán con pilotes de fundición in situ de 35 m de longitud y 1,2 m de diámetro, perforados mediante circulación inversa y diseñados para alcanzar 365t de capacidad de compresión y 220t de capacidad de levantamiento. Las cargas se aplicaron mediante gatos hidráulicos en la cabeza del pilote. Para la modelación, los autores definieron una trayectoria de descarga distinta para las funciones de transferencia de cargas, y modificaron la variable de desplazamiento para considerar los efectos de los desplazamientos pasivos del suelo. La formulación empleada tenía en cuenta diferentes propiedades a lo largo de la profundidad del pilote, como es el caso de la estratificación del suelo. Dicha modelación permitió simular los ciclos de carga teniendo en cuenta trayectorias de descargas en un pilote de 20 m de longitud y 1 m de diámetro.

Los resultados arrojaron una curva típica, con un asentamiento máximo de 114 mm ($\Delta\delta^T$), y también mostraron que, durante la carga, el fuste se movilizó completamente a aproximadamente 4 MPa, cuando el pilote había sufrido aproximadamente 15 mm de asentamiento. Esto era 3 veces el asentamiento necesario para movilizar el fuste localmente (1/S1), poniendo de manifiesto el efecto de la compresibilidad del pilote en la movilización del fuste. Durante la descarga, la punta rebotó hasta aproximadamente el 55% de su capacidad, requiriendo una fuerza descendente del fuste para estar en equilibrio. La calibración del modelo mostró cómo los resultados de una prueba de carga sencilla pueden utilizarse para calibrar las funciones de movilización de un modelo de transferencia de carga y cómo pueden simularse respuestas distintas mediante diferentes parámetros del modelo o considerando la posibilidad de asentamientos del suelo alrededor del pilote (Dias & Bezuijen, 2018).

Caballero (2007) propuso la simulación numérica del comportamiento bajo carga axial de pilotes, utilizando modelos de elementos finitos calibrados para reflejar los resultados de rigidez estática inicial obtenida de los ensayos de respuesta transitoria (TRM), y lograr caracterizar experimentalmente el comportamiento a bajas deformaciones de los pilotes. La modelación fue realizada en el programa MEFDuncan implementado en Matlab, utilizando una formulación axisimétrica y un modelo constitutivo de suelo no lineal que responde a un modelo constitutivo de tipo hiperbólico. Caballero ensayó seis tipos de pilotes diferentes, uno de tipo prefabricado (Pilote Prefab.), y cinco de tipo excavado y hormigonado en sitio (Pilote Atlas, De Waal, Fundex, Olivier y Omega). Los resultados mostraron que los pilotes Atlas, Olivier, Omega y De Waal arrojaron datos concordantes entre ensayos de carga estática de pilotes teóricamente iguales en todos los parámetros analizados, encontrando una desviación estándar del orden del 7 al 12% del valor medio, ya sea de la rigidez estática inicial, de la carga de falla de Davisson o de la carga a una deformación del orden del 10% del diámetro de la punta del pilote. Esta concordancia no se observó en los ensayos de los pilotes Fundex, los cuales presentaron una dispersión del orden del 64% en el valor de rigidez estática inicial y del 46% en la carga de falla de Davisson. En términos cualitativos en todos los casos presentados exceptuando a los pilotes prefabricados, las curvas obtenidas por el modelo numérico fueron de forma similar a las obtenidas por los ensayos de carga estática convencional, y las diferencias pueden

ser explicadas por diferentes razones incluyendo la dispersión de las propiedades de los suelos.

Gavin y Lehane (2007) realizaron ensayos en Pilotes modelo de Laboratorio y de Campo, con el fin de estudiar los factores que afectan a la movilización de la resistencia de la base de los pilotes en la arena. Los datos combinados de laboratorio y de campo fueron utilizados como base para la derivación de un modelo sencillo para predecir la relación entre la presión de la base y el asentamiento de los pilotes en la arena. El estudio fue llevado a cabo por medio de un programa experimental que investigó los efectos del tipo de pilote, la consistencia de la arena y la resistencia de la instalación en la respuesta de la base de un pilote durante la carga estática. Los resultados revelaron que prácticamente no se produce ningún movimiento de la base del pilote durante la carga estática hasta que se supera la tensión residual de la base generada durante la instalación del pilote. Una vez que se supera la presión residual, se muestra una respuesta rígida y lineal de la carga de la base al desplazamiento, durante la cual la rigidez operativa es aproximadamente equivalente a la rigidez elástica de pequeña deformación (E_0) medida antes de la instalación del pilote. Al comparar los resultados con el rendimiento de los pilotes a escala real, se demuestra que la respuesta de la presión de base y el desplazamiento de un pilote en la arena puede predecirse con un nivel de confianza razonable utilizando el valor q_c del CPT, la rigidez de deformación muy pequeña in situ y la relación de llenado (para un pilote de tubo hincado) (Gavin & Lehane, 2007).

Diaz (2013), estudió la respuesta de diferentes pilotes sometidos a carga vertical axial empleando una serie de análisis mediante elementos finitos, considerando como suelo de fundación diez tipos de arenas en condición seca y saturada. El autor propuso un método simplificado para estimar la carga última en pilotes preexcavados sobre arenas, en términos del diámetro y enterramiento del pilote, peso unitario del suelo, condiciones de saturación, y mediciones indirectas de la resistencia al corte del suelo, obtenidas a partir de la densidad relativa y el índice de penetración SPT. La modelación fue realizada mediante una serie de análisis en elementos finitos usando el software comercial PLAXIS 2D, en el cual fueron modelados una serie de pilotes de hormigón preexcavados con sección circular, variando su diámetro, B, y largo, D, empleando pilotes con largos de 7.5, 10, y

15 m, y diámetros de 0.6, 0.8 y 1.0 m. Además, para el modelo de elementos finitos fue usada una malla axisimétrica compuesta por elementos triangulares de 6-nodos y el comportamiento del suelo fue modelado usando una ley constitutiva elastoplástica perfecta, con criterio de rotura Mohr-Coulomb y regla de flujo plástico no asociada. La carga última fue obtenida mediante las curvas carga-asentamiento usando el método de Brinch-Hansen. Los resultados mostraron que, para pilotes en arenas saturadas, se produce una reducción en la carga última respecto a la obtenida en arenas secas. No obstante, esta reducción no varió de forma significativa en los diferentes casos analizados. De esta forma, se obtuvo que la carga última en arenas saturadas es en promedio 70% de la carga última obtenida en arenas secas. La investigación experimental mostró que la respuesta de un pilote depende de parámetros relacionados tanto con el comportamiento tensión-deformación del suelo, como con las características del pilote (Diaz, 2013).

Sánchez (2021), analizó la comparación de pruebas de carga (curva carga vs desplazamiento) de seis pilotes excavados y fundidos in situ cargados axialmente, con respecto a los modelados numéricamente utilizando modelos constitutivos elasto-plásticos: Mohr Coulomb, Hardening Soil y Cam Clay, por medio del programa Midas GTS NX. Los resultados mostraron que, el Modelo constitutivo Cam Clay es ideal para simular el comportamiento de suelos cohesivos en contacto con el pilote, porque además de los parámetros de resistencia considera la consolidación de cada estrato a través de las líneas de consolidación y sobreconsolidación. En el caso de suelos estratificados con arenas y arcillas en general, se observa que los tres modelos se acercan con buena aproximación a los resultados de la prueba de carga. El Modelo Hardening Soil presenta una curvatura inicial, acercándose con buena precisión a la condición de falla tanto en carga como en desplazamiento. En cuanto al Modelo Mohr Coulomb, este presenta resultados cercanos a la prueba de carga, por lo que este método puede utilizarse como una aproximación inicial. Cada uno de los modelos constitutivos utilizados en el programa llegaron a valores de deformación aceptables en la condición de carga admisible en el pilote (Sánchez Guambi, 2021).

Aunque en el pasado se han conducido numerosas investigaciones, tanto teóricas como experimentales, para predecir el comportamiento y la capacidad de soporte de carga de

los pilotes en suelos granulares y cohesivos, los mecanismos aún no se comprenden por completo y quizá nunca lo sean. Así pues, el diseño y análisis de cimentaciones con pilotes se puede considerar un arte como resultado de las incertidumbres implicadas al lidiar con algunas de las condiciones del subsuelo (Das, 2012).

1.2 Justificación

Las cimentaciones profundas son una clase de cimentación pensada para solucionar la transmisión de cargas a los sustratos más resistentes del suelo. Los pilotes son empleados ante determinadas necesidades técnicas: cuando el terreno es de baja calidad o está expuesto a variaciones como hinchamientos o retracciones y en caso de edificaciones de gran altura que sufran la acción de fuertes vientos o que requieran de elementos de tracción o sostenimiento (Posada). Para diseñar y construir pilotes óptimos, se debe realizar un estudio de suelo que permita conocer la capacidad de carga, características físicas y mecánicas, para así lograr proteger la inversión de la obra previniendo pérdidas catastróficas, identificando el posible deterioro que tendrá la construcción, ahorrando costos y evitando demoras al momento de construir (Cortequipos, 2019).

La realización de estos estudios de suelos y de las pruebas de capacidad de carga aplicadas al elemento, facilitan la modelación numérica y el análisis de la interacción Suelo-Pilote.

La modelación numérica, se ha convertido en una herramienta primordial en la caracterización del estado fuerza-desplazamiento de diversos problemas de ingeniería; debido a la implementación computacional de formulaciones débiles de un sin número de modelos matemáticos. La modelación de un problema real es caracterizada a través de un modelo físico y un modelo matemático entre los cuales existe un vínculo que interrelaciona los aspectos de cada uno de ellos (modelo geométrico, constitutivo, de cargas, vínculos o apoyos, ecuaciones de gobierno, condiciones iniciales y definición del dominio de trabajo). Cuando empleamos métodos numéricos en la solución de diversos problemas de ingeniería, la solución que se obtiene es aproximada, y para que un modelo numérico presente cierto

grado de fiabilidad, debe ser sometido a un proceso de calibración numérica (Mesa & J, 2011).

Sin embargo, aunque el uso de pilotes en las cimentaciones es implementado con frecuencia en muchos tipos de construcción, falta claridad sobre el comportamiento y los cambios que el pilote y el suelo pueden sufrir luego de ser sometidos a cargas y descargas o de contar con la presencia de un sobreesfuerzo de confinamiento. Es por esto, que se propone realizar la calibración numérica de la curva Fuerza-desplazamiento obtenida al someter a un pilote a ciclos de carga y descarga, utilizando los datos y la información de un modelo ya realizado en laboratorio.

La calibración del modelo se realizará por medio del programa de elementos finitos Plaxis 2D, ya que este permite realizar un análisis de elementos finitos bidimensionales de deformación y estabilidad en ingeniería geotécnica y mecánica de rocas. Sus funciones principales son: calibrar con precisión los modelos de materiales y permitir el acceso a más funcionalidades con el análisis de sensibilidad y la variación de parámetros (Bentley, 2011).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Evaluar la variación de la rigidez de un pilote sometido a ciclos de carga-descarga ante diferentes niveles de confinamiento, mediante un Modelo de Elementos Finitos (MEF-2D), calibrado con pruebas de laboratorio.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Recolección de información de las propiedades geométricas y mecánicas de los materiales empleados en una prueba de carga en laboratorio, sobre un pilote sometido a ciclos de carga-descarga.
- Realizar la calibración de un modelo en elementos finitos (MEF-2D) según los resultados de una prueba de carga sobre un pilote sometido a ciclos de carga-descarga.
- Identificar la relación entre el desplazamiento en la punta del pilote y la rigidez del suelo, cuando el modelo numérico se encuentra sometido a diferentes niveles de confinamiento.

1.4 Estructura del documento

Este documento se divide en cinco (5) capítulos, el contenido se resume a continuación:

En el capítulo 1 se exponen los objetivos, introducción, antecedentes del tema a tratar y la justificación por la cual se realiza el presente trabajo.

El capítulo 2 hace referencia al marco teórico empleado para la realización de la tesis, en que situaciones se deben utilizar pilotes y los diferentes ensayos de carga a la cimentación, permitiendo comprender la importancia y la afectación que se obtiene a lo largo del tiempo en el pilote, con el fin de facilitar el entendimiento del procedimiento que se realizó en el presente trabajo, las propiedades que se ven perjudicadas, explicar la rigidez con el objetivo de saber interpretar de manera correcta los resultados obtenidos. De igual manera se explica el método de elementos finitos y el programa PLAXIS 2D, con la finalidad de un mejor manejo del programa ya que este se utiliza para la modelación numérica.

En el capítulo 3 se presenta la metodología utilizada para realizar el presente trabajo, basándose en una representación gráfica o diagrama de flujo empleado para alcanzar los objetivos propuestos. Inicialmente se trata sobre el ensayo de laboratorio guía, el equipo

utilizado en este y el procedimiento realizado. Luego, se explica la modelación y calibración del modelo numérico en el programa Plaxis 2D. El último ítem de la metodología, consiste en el análisis paramétrico en el cual se varía la sobrecarga de confinamiento aplicada al pilote.

En el capítulo 4 se presentan los resultados del comportamiento de las gráficas fuerza-desplazamiento obtenidas del ensayo de laboratorio y de la modelación numérica a partir de un pilote situado en un suelo de arena suelta pobremente gradada. Así mismo se analizan los siguientes puntos:

- Comportamiento del pilote luego de ser sometido a ciclos de carga axial, descarga posterior y recarga
- Relación entre la rigidez del suelo y el desplazamiento del pilote.

Finalmente, en el capítulo 5, se realizan conclusiones basadas en los resultados obtenidos del modelo numérico calibrado.

Capítulo 2

2. Marco teórico

2.1.1 Pilotes

Los pilotes son elementos estructurales utilizados para construir cimentaciones profundas, en los proyectos donde las cimentaciones superficiales no garantizan seguridad e integridad a la estructura, dichos elementos pueden estar hechos de acero, concreto, plástico o madera. A pesar de su costo, el uso de pilotes es utilizado con frecuencia para asegurar la seguridad estructural. A continuación, se describen diferentes condiciones del suelo y de carga, que requieren de la implementación de cimentaciones profundas:

- a) Si existen suelos compresibles o débiles para soportar la carga transmitida de la estructura, se utilizan pilotes para que transmita la carga a la roca subyacente o a al estrato con suelo más fuerte y firme.
- b) Si no se encuentra un estrato de suelo fuerte o una roca subyacente, el pilote transmite la carga estructural gradualmente al suelo, ella se deriva de la resistencia por fricción entre la interfaz del suelo-pilote.
- c) Cuando se localizan fuerzas horizontales, los pilotes resisten por flexión, esto ocurre en estructuras de contención y estructuras altas sometidas a vientos fuertes o fuerzas sísmicas altas.
- d) Si hay presencia de suelos expansivos y/o colapsables, se utilizan cimentaciones profundas, donde su profundidad se extiende más allá de la zona activa.
- e) Las cimentaciones debajo del nivel freático se encuentran sometidas a fuerzas de levantamiento, por tal razón las cimentaciones profundas se realizan para resistir esta fuerza.

f) Los estribos y pilas de los puentes se construyen sobre cimentaciones profundas, que evitan la pérdida de carga debido a la erosión del suelo en la superficie.

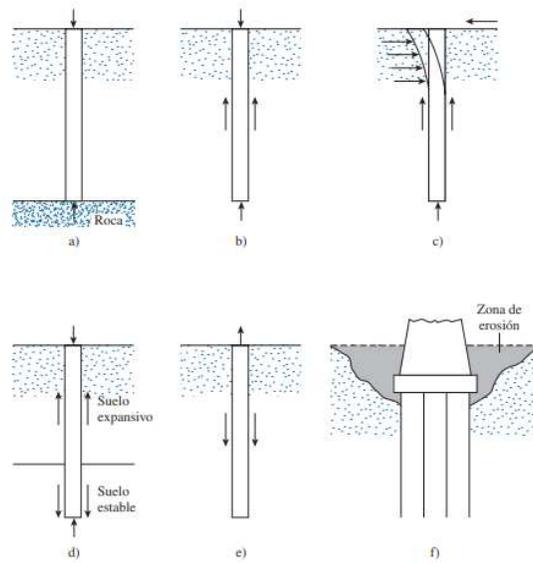


Figura 2-1 Condiciones para el uso de cimentaciones profundas. Tomado de (Das, 2012)

Existen diferentes tipos de pilote según las condiciones del subsuelo, la carga que soportará y ubicación de nivel freático: Acero, concreto, madera y compuestos.

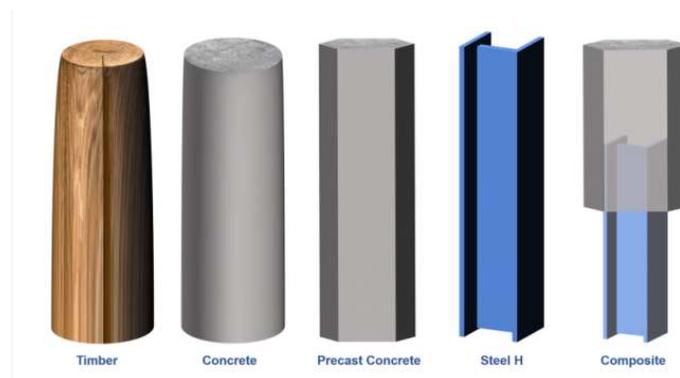


Figura 2-2 Representación tipos de pilote tomado de SkyCiv (2022)

La base del pilote transmite las cargas al suelo a través de la resistencia lateral y de punta. La resistencia de la punta es la base del área del pilote que se encuentra en contacto con el suelo, y la resistencia lateral es la fricción entre el suelo y la cimentación a los lados. Conocer el comportamiento del pilote bajo cargas axiales es de su importancia para entender el funcionamiento de la estructura y las propiedades a las que influye en el suelo y en el elemento. Como afectará la rigidez de este y el desplazamiento (Das, 2012).

2.1.2 Calculo de pilotes - Pruebas de carga

Para el diseño de los pilotes es imprescindible tener datos que faciliten conocer el comportamiento de los pilotes bajo carga axial, para lo cual existen diferentes métodos de ensayos:

- **Prueba de carga estática:** Estas pruebas se realizan durante la fase de diseño o la construcción, teniendo en cuenta el tamaño del proyecto. Este método resulta ser el más cercano a la realidad en el comportamiento del pilote bajo carga. Se determina la capacidad del cimiento en forma directa; algunos tipos de prueba son: Ensayo de compresión axial, ensayo a tracción y Carga lateral; la carga es aplicada en incrementos cortos y se registra cada movimiento del pilote. Una de sus limitaciones es la plataforma de reacción para la carga que se debe aplicar a la cabeza del cimiento, tiempo de ensayo alto, sumado a costos de transporte e instalación de mecanismos de anclaje (Gil Lablanca).
- **Prueba de carga bidireccional o célula Osterberg:** Se lleva a cabo mediante la célula de Osterberg donde se coloca en la punta o fuste del pilote dentro de la perforación en el proceso de hormigonado, la célula es expandida hidráulicamente para que la parte superior del pilote reacciona contra la inferior. Se mide la resistencia de fuste y punta individualmente. Una de sus limitaciones a los altos costos que implica su ejecución (Caballero K. R., 2007).

- **Prueba de carga dinámicas:** Son ensayos con grandes deformaciones y aceleraciones tomadas en la cabeza del pilote, al utilizar dispositivos de hincado sobre el cimiento, se determina la resistencia del suelo bajo carga estática en base de la teoría de ecuación de onda. Al utilizar esos equipos se puede reducir los costos y tiempo de ensayo, pero una de sus limitaciones es la dificultad por los efectos inerciales y dependencia de la rigidez del suelo respecto a la velocidad de aplicación de carga. Los ensayos de carga dinámica han aumentado ya que pronostican la resistencia estática del suelo y el comportamiento carga-asentamiento (Caballero K. R., 2007).
- **Prueba de carga rápida:** Son ensayos con grandes deformaciones, donde se utiliza un cilindro de combustión controlada en la campana de presión o maza de caída libre sobre un aparato amortiguador de baja rigidez. Dado a que la longitud de onda es suficientemente larga que abarca la longitud del pilote no es imprescindible realizar un análisis de ecuación de onda complejo. Sus limitaciones son parecidas a las pruebas dinámicas y pueden encontrarse efectos con gran influencia en los resultados (Caballero K. R., 2007).
- **Método de respuesta transitoria (TRM):** Este método también es conocido como “Método de admitancia mecánica”, es el resultado de un pilote sometido a una aplicación de carga impulsiva en la cabeza de este, a partir de una fuerza de impacto. Son ensayos de bajas deformaciones, basado en la medición del movimiento y fuerza del pilote debido a una carga de tipo impulsiva. Se registran los datos en función del tiempo y el análisis del dominio de la frecuencia permite calcular la rigidez (Kohan, Prato, & Pinto, 2012).

2.1.3 Resistencia en punta de pilotes

A pesar de que existen diferentes métodos para calcular la resistencia última en la punta de los pilotes, la fórmula más usada y aceptada es cuando el desplazamiento de la base del pilote es igual al 10% el diámetro de este (Gavin & Lehane, 2007). De Cock (2003) emplea la siguiente ecuación: $q_{b0.1} = \alpha q_c$, donde $q_{b0.1}$ es el diámetro del pilote, q_c resistencia a la penetración de cono también conocida como resistencia de punta y α es un factor empírico, que ha variado con el paso de los años debido a numerosos estudios y ensayos. Jardine (2005) realizó un estudio de pilotes hincados en arena densa, donde muestra una capacidad de carga la cual oscila entre un 21% por debajo del valor medio del factor α , alrededor de 0,53 (Jardine, Chow, Overy, & Standing, 2005), por lo cual sugiere cambiar el valor de la variable α , donde se debe reducir a medida que el diámetro del pilote aumenta (Gavin & Lehane, 2007).

Cuando los pilotes penetran completamente durante la instalación (es decir, cuando la relación de llenado incremental (Incremental Filling Ratio-IFR) es 1) provoca un desplazamiento del suelo mucho menor que los pilotes cerrados y obtienen valores de $q_{b0.1}$ comparables a los pilotes perforados, por tal razón Xu y Lehane (2005) proponen un enfoque de diseño para pilotes de desplazamiento más conocido como método UWA-05. El método UWA-0.5 es utilizado para predecir la capacidad axial de pilotes hincados en arena, incluye la relación del área efectiva en la capacidad de punta y fuste del pilote. Este método es basado en el ensayo CPT y presenta una mejora significativa a los que ya habían anteriormente (Lehane, Schneider, & Xu, 2007). En 2007, Lehane sugiere que el factor sea de un valor constante igual a 0,6 para todos los diámetros, siguiendo el método de diseño UWA-0.5, este factor de reducción se debe principalmente a la movilización parcial de la resistencia de la base en el asentamiento $D/10$; en comparación con los pilotes de acero, los pilotes hincados muestran una respuesta más rígida y mayor capacidad en la punta del pilote, debido a la rigidez y carga residual (Kikuchi, Otani, Kimura, & Morikawa, 2007). Para los pilotes de perforación completa, denominados así debido a que en su ejecución la perforación del terreno se realiza por extracción y posteriormente vaciado del concreto; el valor medio de α es de 0,2 empleando los métodos de diseños

Europeos. Para los pilotes cerrados, White & Bolton (2005) y Lehane (2005) encontraron un $\alpha = 0.9$ para una base de datos de pruebas de carga basadas en criterio de asentamiento $D/10$. (Lehane, Schneider, & Xu, 2007)

En 2002, Lejane y Randolph proponen un enfoque para predecir la respuesta de la presión de la punta del pilote y el asentamiento bajo carga estática, donde la resistencia unitaria desarrollada bajo este (q_{ann}) y por el suelo (q_{plug}) se consideran por separado, se toma en cuenta una instalación completamente perforada ($IFR = 1$) y asumen que la respuesta de la rigidez de la arena bajo el pilote puede ser modelada usando una forma reordenada de la expresión hiperbólica desarrollada para pilotes perforados por Fleming (1992), sugiriendo que la instalación del pilote no tiene efecto significativo en la rigidez del suelo (Gavin & Lehane, 2007).

Cuando una carga Q en la superficie de un terreno se aumenta de forma gradual, la resistencia por fricción máxima en el fuste se movilizará por completo cuando el desplazamiento entre el suelo y pilote sea aproximadamente 5 a 10mm. En cambio, la resistencia máxima en punta del pilote no se movilizará hasta que la punta del pilote se haya movido aproximadamente 10 a 25% del ancho del pilote. Esto quiere decir que la fricción a lo largo del fuste se desarrolla a un desplazamiento menor comparado con la resistencia en la base del pilote. (DAS, 2012). La resistencia en punta es el producto de su sección transversal por la capacidad de carga unitaria última de la base. La prueba de penetración del cono (CPT), es también conocida como prueba de penetración estática, donde originalmente se utilizaba un cono a 60° con un área base de 10 cm^2 , se hincaba a una velocidad constante de 20 mm/s para así medir la resistencia a la penetración la cual también se denomina resistencia de punta (DAS, 2012, págs. 98-99).

Mansur y Hunter (1970), realizaron una prueba de carga en un pilote de acero en arena, donde dio como resultado que la fricción superficial se movilizará más rápido a niveles de asentamientos bajos en comparación con la carga de punta, donde allí se crea una zona triangular que empuja hacia abajo sin producir ninguna otra superficie de deslizamiento visible.

Método de Meyerhof (1976), para estimar la capacidad de carga de punta de un pilote se simplifica en $Q_p = A_p q_p$, en arena la capacidad aumenta con la profundidad de empotramiento en el estrato de carga y logra un valor máximo a una relación de empotramiento de L_b/D . Sin embargo, cuando un pilote ha penetrado en un estrato de carga $L_b < L$, el valor de capacidad de carga de punta tendrá un valor constante (DAS, 2012).

2.1.4 Rigidez en el Suelo

En el ensayo dinámico, la rigidez que se obtiene desprende dos componentes en el dominio de las frecuencias, una parte real y otra imaginaria; la parte real representa la rigidez estática y la parte imaginaria representa la rigidez dinámica debida a la irradiación de energía mecánica que se transmite por el suelo y que se manifiesta como amortiguamiento. Para esto, se debe utilizar una curva de extrapolación que contemple las características previamente descritas (Caballero & Prato, 2007). Una buena aproximación de la rigidez en el suelo se obtiene a partir del módulo de corte G , el cual se calcula por medio de la velocidad de ondas sísmicas. La rigidez dinámica se puede calcular de acuerdo a la siguiente expresión:

$$K_d = \frac{\lambda \cdot AE \left(-\lambda \cdot E e^{(i\lambda L)^2} + \rho^S V_p^S \omega + \lambda \cdot E + \rho^S V_p^S \omega \cdot e^{(i\omega L)^2} \right)}{i \cdot \left[-(\lambda \cdot E + \rho^S V_p^S \omega) + e^{(i\lambda L)^2} (-\lambda \cdot E + \rho^S V_p^S \omega) \right]}$$

La parte real es aproximadamente independiente de la frecuencia y la parte imaginaria es lineal con esta.

$$\begin{aligned} \text{Re}(K_d) &\cong K_0 \\ \text{Im}(K_d) &\cong P \cdot f \\ |K_d| &= \sqrt{\text{Re}(K_d)^2 + \text{Im}(K_d)^2} \end{aligned}$$

K_0 es la rigidez estática inicial y $\text{Re}(K_d)$ es la parte real e $\text{Im}(K_d)$ es la parte imaginaria de la rigidez dinámica. La rigidez es una medida cualitativa de la capacidad de un

material para resistir deformaciones elásticas, incluida la capacidad de un elemento estructural para soportar cargas o tensiones sin una deformación significativa. Esta también es la relación entre la fuerza aplicada y el desplazamiento (deformación del suelo) obtenido al aplicar la fuerza. En el análisis estructural es de suma importancia conocer las deformaciones que se obtienen debido a las cargas que la cimentación transfiere al suelo, la constante que determina la relación entre la fuerza y el desplazamiento de los pilotes se conoce como coeficiente de balasto y se dispone tanto de forma vertical como horizontal, dependiendo de la dirección de la fuerza que se analiza. El coeficiente depende de las dimensiones de la cimentación y las propiedades del suelo (Alvarez Pedraza, Definición de Coeficientes de Balasto para el Diseño de Fundaciones, 2015).

Para la obtención del coeficiente de balasto vertical se han realizado diferentes ensayos y diversos autores han desarrollado fórmulas para el cálculo de este, considerando el módulo de elasticidad del suelo (E) y coeficiente de Poisson (ν). Estos parámetros comúnmente son obtenidos en los ensayos triaxiales y de compresión sin confinar, debido a que deben ser muestras no perturbadas o inalteradas; y para los suelos granulares los parámetros se obtienen en ensayos de exploración del subsuelo. Cuando se tienen parámetros sensibles a los cambios de estructura y relación de vacíos, se han desarrollado la correlación con otros parámetros como número de golpes del ensayo de penetración normal y la resistencia a la penetración del ensayo de cono holandés.

Normalmente, la rigidez se calcula como la razón entre una fuerza aplicada y el desplazamiento obtenido por la aplicación de esa fuerza

$$Rigidez = \frac{Fuerza}{Desplazamiento}$$

2.1.5 Método elementos finitos

El método de los elementos finitos (MEF en español o FEM en inglés), es un método numérico aproximado, utilizado en diversos problemas de ingeniería para resolver ecuaciones diferenciales por medio de aproximaciones discretas, es utilizado

principalmente para conocer y analizar la deformación de una pieza ante una serie de situaciones, entendiéndose estas como restricciones de movimiento y fuerzas externas. En esencia, se busca “dividir un objeto con una geometría complicada mediante elementos pequeños con geometrías básicas” (Gelacio, 2012).

El objetivo del MEF es transformar un sistema continuo en un modelo discreto aproximado (figura 2-3), a este cambio se le denomina discretización del modelo; en síntesis, se denominan sistemas continuos aquellos que necesitan infinitos grados de libertad (número de movimientos posibles por nodo de un sistema estructural) para ser exactamente definidos, por el contrario, los sistemas discretos son aquellos que pueden ser definidos por medio de un número finito de grados de libertad (Cortinez & Giron, 2005).

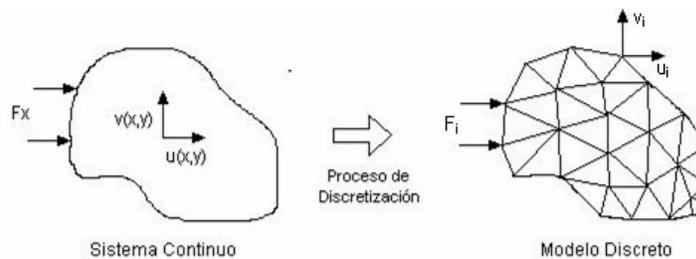


Figura 2-3 Proceso discretización. Tomado de Cortinez & Girón (2012)

La fundamentación del método de los elementos finitos es la representación de un cuerpo por un ensamble de subdivisiones llamadas elementos. Estos elementos se interconectan a través de puntos llamados nodos (figura 2-4), al conjunto de todos estos ítems (elementos y nodos), se le conoce como malla. Debido a la subdivisión de la geometría, las ecuaciones matemáticas que gobiernan el comportamiento físico no se resuelven exactamente, sino que se aproximan mediante este método numérico. La precisión del método de elementos finitos depende del número de nodos y elementos, y del tamaño y tipo de elementos de malla. Por lo tanto, cuanto menor sea el tamaño y mayor el número de elementos en la malla, más precisos serán los resultados del análisis (Prado, Cervantes, & Ortiz, 2013).

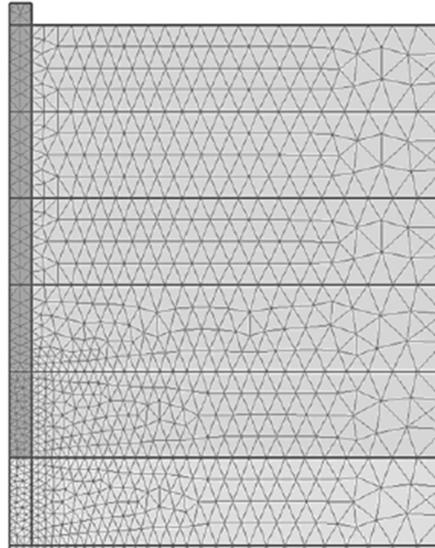


Figura 2-4 Esquema malla axisimétrica elementos finitos. Tomada de Diaz (2013)

El espacio geométrico (dominio) se divide mediante puntos (en el caso lineal), mediante líneas (en el caso bidimensional) y mediante superficies imaginarias (en el caso tridimensional) (Ingeniería mecánica y automotriz, 2020). Los conjuntos de elementos utilizados para la resolución por medio del método de elementos finitos son (Figura 2-5):

- Elementos lineales (1-D): Estos pueden ser resortes, barras, caños, vigas.
- Elementos planos (2-D): Estos pueden ser membranas, placas, carcasas compuestas, superficies sin espesor.
- Elementos sólidos (3-D): Hay 2 tipos principales de elementos 3D, elementos tetraédricos (4 caras, 4 nodos) y elementos hexaédricos (6 caras, 8 nodos).

Es posible la combinación de estos elementos actuando en conjunto.

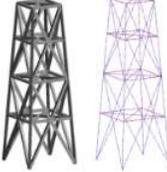
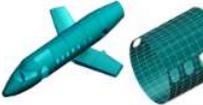
	Geometry	Model name	Finite element	Example
1D		Bar/Truss		
		Beam		
		Tube/Pipe		
2D		Plate		
				
3D		Solid		
				

Figura 2-5 Espacio geométrico tomado de Ingeniería y Mecánica automotriz (2020)

Los elementos finitos consideran una serie de etapas a la hora de solucionar problemas, en primera medida se encuentra la fase del pre proceso, en esta etapa, se busca crear y discretizar el dominio (subdividir la geometría en nodos y elementos), seguidamente se asume una función continua aproximada para la solución del elemento, se desarrollan las ecuaciones para cada elemento, se construye la matriz de rigidez global y se le aplican las condiciones de frontera, condiciones iniciales y las cargas (Zienkiewicz, 2007). La fase de solución busca resolver el conjunto de ecuaciones algebraicas para obtener los resultados globales (valores de desplazamientos y temperaturas en algunos nodos); como fase final, está el pos proceso, esta etapa es importante por la interpretación de los resultados numéricos obtenidos en el procedimiento anterior (fase de solución) ya que los datos suministrados posiblemente no sean los correctos, es de suma importancia el criterio del ingeniero a la hora de diferenciar un buen diseño de un diseño deficiente, para esto, la correcta aplicación del MEF requiere de:

- Desarrollo de una estrategia global para la creación del modelo.
- Conocimiento a priori de la estructura a analizar.

Comparación del comportamiento de la estructura idealizada con el comportamiento esperado de la estructura real (Medina, Salas, Richard , & Bertram, 2005).

La aplicación del método de elementos finitos (MEF) principalmente fue desarrollado para el análisis de estructuras, sin embargo, puede representar entre otros, los siguientes fenómenos físicos: simulación de efectos dinámicos (choque de dos cuerpos), geomecánica (comportamiento de la corteza terrestre), fenómenos termodinámicos (distribución de temperaturas en un sólido). Actualmente, el método permite resolver prácticamente cualquier situación física que pueda formularse mediante un sistema de ecuaciones diferenciales. La implantación de estos métodos de discretización ha dado lugar a herramientas de software útiles entre los cuales, se destacan: 3DEC, Geo5, Open sees, ABAQUS, PLAXIS2D, etc. (Zienkiewicz, 2007).

2.1.6 Modelo constitutivo Hardening Soil

El modelo de suelo con endurecimiento (Hardening Soil model) ayuda a simular el comportamiento de diferentes tipos de suelos ya sean estos cohesivos o granulares; el HSM es considerado como una variante elastoplástica del modelo hiperbólico de Duncan y Chang: “El modelo hiperbólico fue propuesto inicialmente por Konder y Zelasko (1963), posteriormente fue presentado en forma incremental por Duncan y Chan (1970). El mismo parte del presupuesto de que las curvas esfuerzo-deformación del suelo pueden aproximarse a una hipérbola” (Herrera Suarez, Gonzalez Cueto, Iglesias Coronel, De La Rosa Andino, & Madruga Hernandez , 2010). La idea básica del modelo es la relación hiperbólica entre la deformación axial y el esfuerzo desviador. (Vintimilla Avila & Avila Redrovan, 2016). El modelo Hardening Soil se diferencia del anterior en tres aspectos fundamentales:

- Recurre a la teoría de la plasticidad en vez de la teoría de la elasticidad
- Incluye la dilatación del suelo

- Introduce un cierre de la superficie de fluencia sobre el eje de tensión isotrópica p' del espacio de Cambridge (Yield cap)

El modelo de Hardening seleccionado para representar el comportamiento mecánico del suelo requiere varios parámetros de entrada básicos: el módulo edométrico (E_{oed}), módulo de rigidez (E_{50}), módulo elástico (E_{ur}), el coeficiente de presión lateral de tierra para suelos normalmente consolidados (K_0^{nc}), Coeficiente de Poisson en descarga-recarga (ν_{ur}), el ángulo de dilatancia (ψ), la cohesión (c) y ángulo de fricción (ϕ) para la resistencia al corte del suelo; de igual manera el modelo cuenta con un total de 11 parámetros los cuales se encuentran en la siguiente tabla.

Resistencia	c	Cohesión	[kPa]
	ϕ	Ángulo de fricción interna	[°]
	ψ	Ángulo de dilatancia	[°]
Rigidez	E_{50}^{ref}	Rigidez secante en ensayos triaxiales	[kPa]
	E_{oed}^{ref}	Rigidez tangente en cargas edométricas	[kPa]
	m	Potencia de la dependencia tensional de la rigidez	-
Avanzados	E_{ur}^{ref}	Rigidez en descarga-recarga	(por defecto $E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$) [kPa]
	ν_{ur}	Coeficiente de Poisson en descarga-recarga	(por defecto $\nu_{ur} = 0,2$) -
	σ'_{ref}	Tensión de referencia para las rigideces	(por defecto $\sigma'_{ref} = 100$) [kPa]
	K_0^{nc}	Coeficiente de presión lateral de tierras	(por defecto $K_0^{nc} = 1 - \text{sen}\phi$) -
	R_f	Relación entre q_f y q_u	(por defecto $R_f = 0,9$) -

Tabla 2-1 Parámetros del modelo Harding Soil. Tomado de Plaxis (2004).

2.1.7 Plaxis 2D

PLAXIS es un software líder en simulación de ingeniería geotécnica, desarrollado por Bentley Systems, es utilizado específicamente para el análisis de deformación de suelos y rocas. PLAXIS, reconocido por su facilidad de uso y precisión, incluye herramientas de creación de geometría y configuraciones automatizadas para permitir que los problemas geotécnicos se analicen de manera eficiente y precisa con un mínimo de capacitación; por lo tanto, representa una ayuda eficiente en el desarrollo óptimo de diseños de manera más efectiva que la aplicación de métodos de cálculo conservadores tradicionales. Este software

permite la creación de modelos de elementos finitos de manera eficiente con un flujo de trabajo geotécnico lógico. Mediante un entorno de trabajo similar a CAD, donde también se puede importar geometría de este tipo de archivos, posibilita la definición de todos los elementos, partiendo desde los perfiles de suelo hasta distintos elementos estructurales como pilotes, geotextiles, anclajes, cargas y desplazamientos prescritos (Brinkgreve, Kumarswamy, & Swolfs, 2015).

Entre sus funciones se encuentra la modelación con precisión del proceso de construcción, activando y desactivando grupos de suelo y elementos estructurales en cada fase de cálculo con construcción por etapas y considerando el flujo de agua subterránea en estado estable para condiciones saturadas y parcialmente saturadas. Con los tipos de cálculo de análisis de plástico, consolidación y seguridad, se puede analizar una amplia gama de problemas geotécnicos. Los modelos constitutivos van desde modelos lineales simples hasta modelos altamente no lineales avanzados a través de los cuales se puede simular el comportamiento del suelo. En cuanto al análisis de resultados facilita su interpretación al mostrar las fuerzas, los desplazamientos, las tensiones y los datos de flujo en gráficos de contorno, vectoriales y de isosuperficie de varias maneras. Además de permitir un análisis minucioso de los resultados según las capacidades de secciones transversales. Esta herramienta posibilita la transferencia de datos a través de tablas y secuencias para un análisis posterior en programas externos, así como la creación de gráficas a partir de los resultados obtenidos con los datos de cálculo ingresados (Brinkgreve, Kumarswamy, & Swolfs, 2015).

Capítulo 3

3. Metodología

En este capítulo se presenta la metodología empleada para evaluar la resistencia y la rigidez de un pilote en la punta, cuando el pilote se encuentra sometido ante diferentes ciclos de carga-descarga y distintos niveles de confinamiento. Para llevar a cabo este estudio, se realizó la modelación y calibración de un modelo numérico, teniendo como guía el modelo experimental realizado por medio de ensayos de carga axial en pilotes prefabricados según la tesis “Axial Load Transfer in large-scale Physical Model Drilled Shaft Foundations” realizada por Martin L. Wallace (2019).

Para evaluar la relación entre la rigidez del suelo y el desplazamiento del pilote se realizó un análisis paramétrico considerando variaciones en la sobrecarga aplicada al suelo. Se varió la sobrecarga de confinamiento para 4 casos de estudios (10PSI, 20PSI, 30PSI y 40PSI), y se implementó diferentes ciclos de carga-descarga para cada uno de estos. Los resultados obtenidos del documento guía fueron comparados con los de la modelación numérica realizada mediante el programa Plaxis 2D, con el fin de verificar la similitud entre los resultados del modelo numérico y los resultados de las curvas esfuerzo-deformación obtenidas en laboratorio.

A continuación, se presenta la representación gráfica de la metodología propuesta para el desarrollo de la investigación.

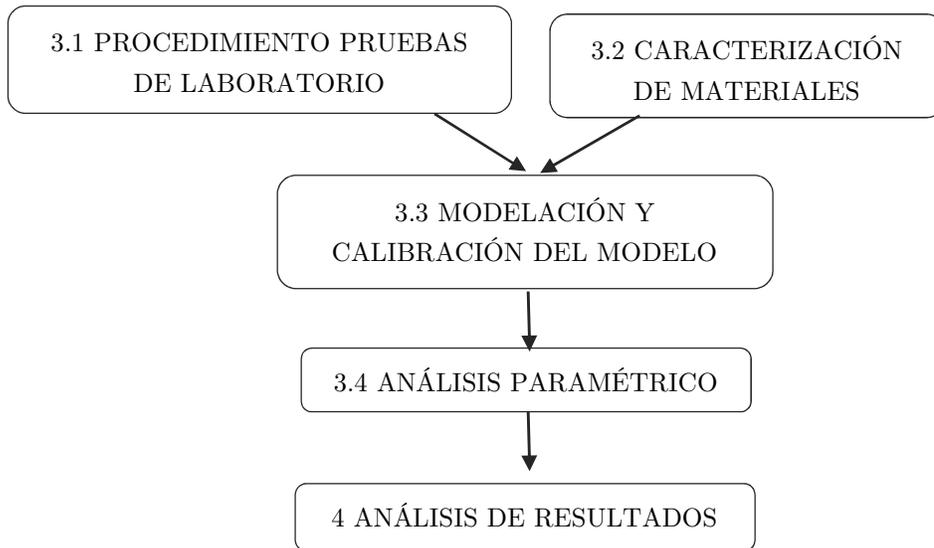


Figura 3-1 Representación gráfica de la metodología empleada para el desarrollo de la presente investigación.

3.1 Procedimiento pruebas de laboratorio

3.1.1 Montaje del aparato experimental

El aparato experimental utilizado en el estudio consta de una cámara cilíndrica hueca, en la cual se coloca un modelo de cimentación profunda, el suelo, un marco de reacción para resistir la carga axial aplicada por un gato hidráulico, un sistema de confinamiento para aplicar la tensión de sobrecarga deseada al suelo, y un sistema de instrumentación para registrar las deformaciones y las cargas soportadas por el pilote probado (Wallace, 2019).

El conjunto de la cámara consta de una placa inferior, una cámara cilíndrica de acero y una placa superior. En la Figura 3-2 se muestra el ensamblaje de la cámara y el marco de reacción. La cámara mide 5 pies (1.524m) de alto por 5 pies (1.524m) de diámetro con un espesor de pared de $\frac{3}{4}$ de pulgada (Wallace, 2019).

La cámara cilíndrica de acero se sitúa sobre la placa inferior y se une a las placas superior e inferior con diez pernos de acero A325 de 1 pulgada de diámetro. La placa inferior se encuentra sobre dos vigas de acero W18x130. La placa superior está reforzada con dos secciones de canal C12x20.7 y tiene una abertura cuadrada de 15 pulgadas centrada debajo de la riostra transversal. Durante la prueba, el marco de reacción se encuentra sobre las secciones del canal y se une a las secciones en W debajo de la placa inferior con ocho barras DYWIDAG roscadas de 1 ¼ de pulgada y 150 ksi (1034.21 MPa) con placas de anclaje y pernos de acero estructural (Wallace, 2019).

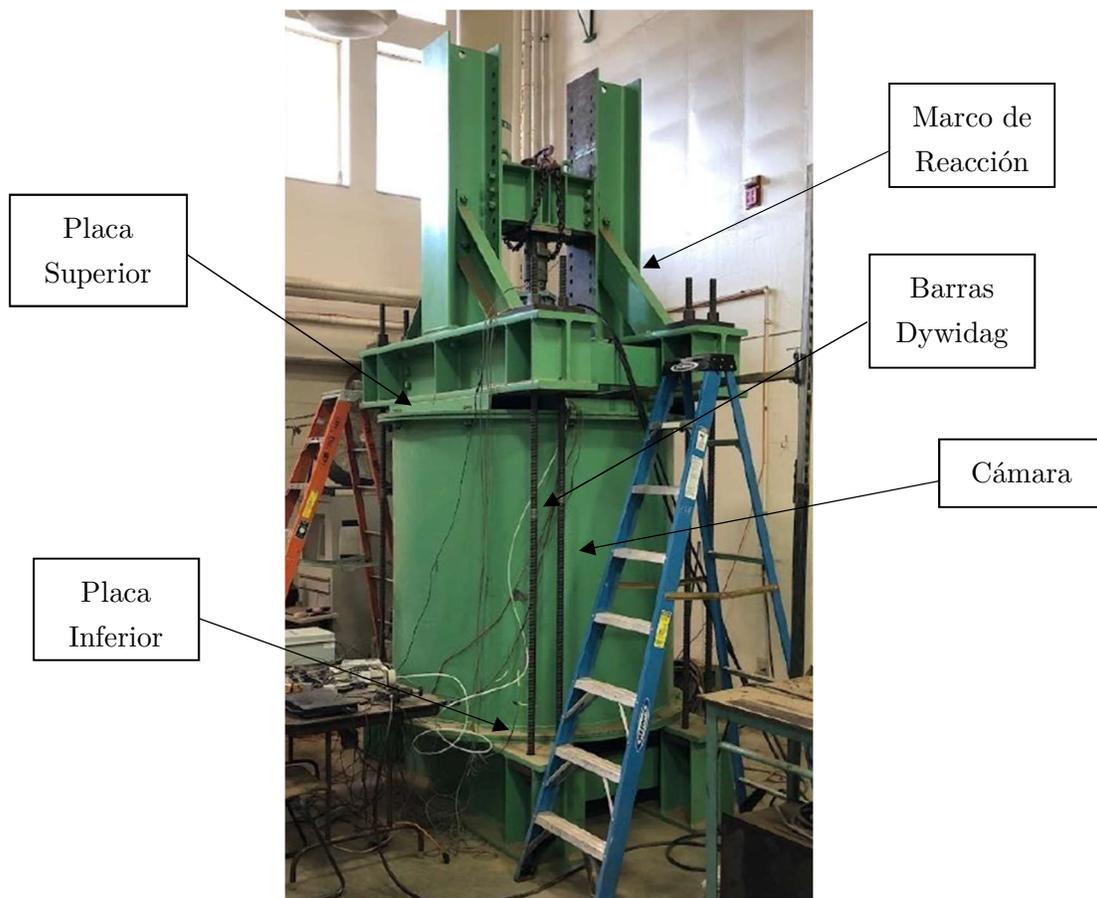


Figura 3-2 Configuración del aparato experimental utilizado en el estudio de laboratorio.
Tomada de Wallace (2019).

En la figura 3-3 se puede observar el marco de reacción que consta de dos vigas de acero W12x152 que actúan como base, dos pilotes verticales HP12x74, una riostra transversal con altura ajustable formada por dos vigas de acero MC12x45 que conecta los pilotes verticales y una celda de carga con una capacidad de 150,000 libras (Wallace, 2019).

El gato hidráulico se encuentra conectado a la celda de carga y tiene una válvula de control hidráulico de cuatro vías y un regulador hidráulico manual que controla la presión suministrada al gato hidráulico. La válvula de control hidráulico se mantiene abierta durante la prueba mientras el regulador hidráulico se ajusta a la presión deseada. La bomba hidráulica tiene una capacidad máxima de 6000 psi (Wallace, 2019).

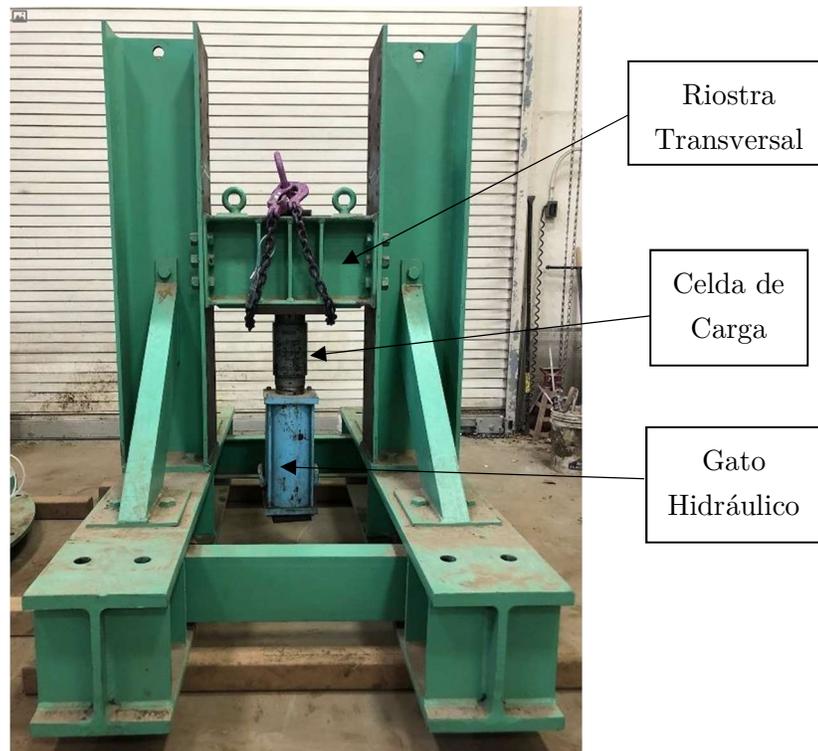


Figura 3-3 Configuración del marco de reacción, donde se evidencia la riostra transversal, celda de carga y gato hidráulico. Tomada de Wallace (2019).

Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo sobre un pilote prefabricado con medidas de 16 pulgadas de diámetro (0.4064m) y 28 pulgadas de alto (0.7112m) con una resistencia a la compresión de 28 días de 5600 psi (38 MPa). Estas características se emplearon con el fin de que el pilote fuera capaz de simular su comportamiento en el entorno de laboratorio. Por esta razón, la cimentación modelo fue prefabricada con concreto, barras de acero de refuerzo, calibradores de tensión y tubos de PVC (Wallace, 2019).

La figura 3-4 muestra una vista del modelo de cimentación antes de ser fundido en concreto, compuesto por una jaula de barras de refuerzo utilizando una malla de alambre de 1/16 pulgadas con aberturas de 3 pulgadas (0.0762m) por 6 pulgadas (0.1524m). La jaula de barras de refuerzo tiene 12 pulgadas de diámetro (0.3048m). Además, se unieron diez barras de refuerzo N°4 a la malla de alambre y dos tubos de PVC de 1 pulgada de diámetro exterior unidos al exterior de la jaula de barras de refuerzo (Wallace, 2019).

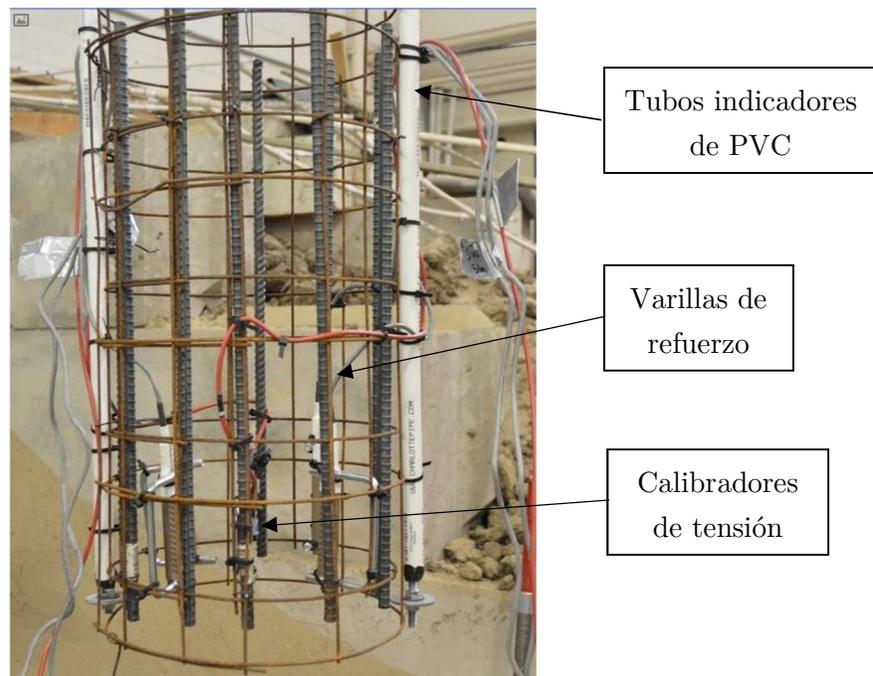


Figura 3-4 Jaula de armadura con tubos de PVC, varillas de refuerzo y calibradores de tensión. Tomada de Wallace (2019).

Los calibradores de tensión se espaciaron uniformemente alrededor del interior de la jaula de refuerzo. Estos estaban unidos a pernos en U de metal estándar que a su vez estaban unidos a la jaula de refuerzo como se muestra en la figura 3-5. La Figura 3-6 se muestra el modelo final de cimentación de pozo perforado empleado en la prueba de laboratorio (Wallace, 2019).

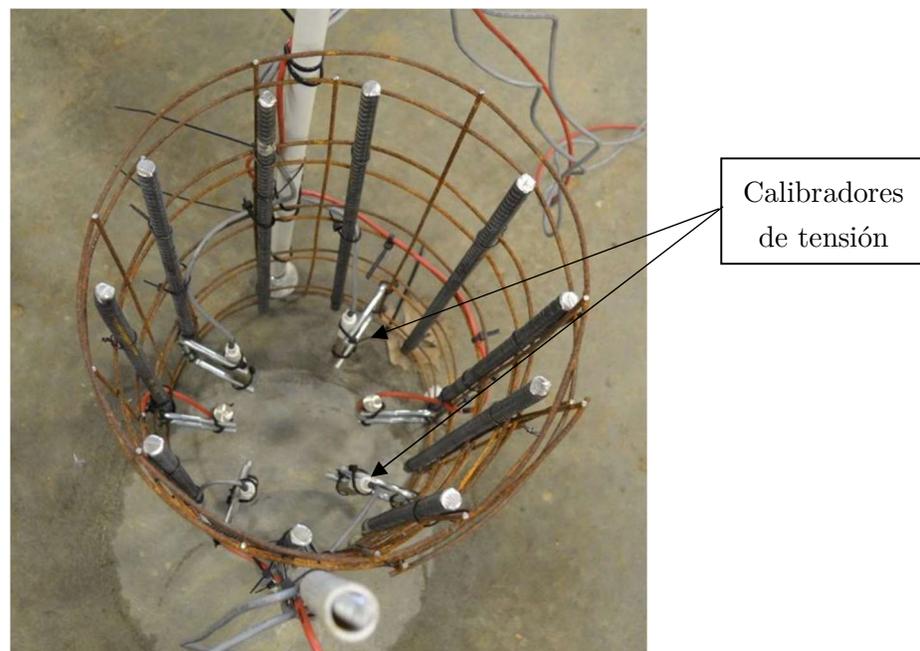


Figura 3-5 Vista superior del modelo de cimentación de pozo perforado antes de ser fundido mostrando las ubicaciones de los calibradores de tensión. Tomada de Wallace (2019).



Figura 3-6 Modelo final del pilote utilizado durante la prueba de laboratorio. Tomada de Wallace (2019).

3.1.2 Procedimiento de prueba

El procedimiento de prueba de laboratorio involucró varios ciclos de carga, descarga y recarga. A continuación, se presentan los pasos empleados durante las pruebas de laboratorio. (Wallace, 2019):

1. Se encendió la bomba hidráulica y se extendió el gato justo por encima de la base del modelo.
2. Se aplicó a los cimientos una carga de asiento de aproximadamente 3 kips (13,34 kN).
3. La carga axial se incrementó por pasos hasta alcanzar valores predeterminados basados en el asentamiento previsto. Los pasos se determinaron basándose en la experiencia previa y en un cuidadoso seguimiento de los datos de asentamiento de la carga durante las pruebas.
4. Durante la prueba, se controló y registró el indicador de cuadrante. La carga no se incrementó al siguiente paso de carga hasta que el indicador de cuadrante y los datos del

LVDT dejaron de moverse. Para la prueba con arena mal gradada, cada paso de carga tomó aproximadamente de 3 a 5 minutos.

5. Una vez que se detuvo el movimiento, se usó la bomba hidráulica para disminuir la carga axial en el modelo de cimentación. En todos los pasos de carga, el modelo de cimentación se descargó hasta cero.

6. Una vez que se tomaron las lecturas de cero, se repitieron los pasos 2 a 5. El número de ciclos de carga, descarga y recarga dependía de la carga máxima, la capacidad de la bomba hidráulica y la magnitud del desplazamiento total registrado durante la prueba.

7. El modelo de cimentación se volvió a cargar con la carga máxima anterior. La figura 3-7 muestra un resultado anotado con flechas que indican la trayectoria carga-descarga-recarga. Después de alcanzar la carga máxima anterior, la carga axial se incrementó al siguiente paso de carga antes de descargarse como en el paso 5.

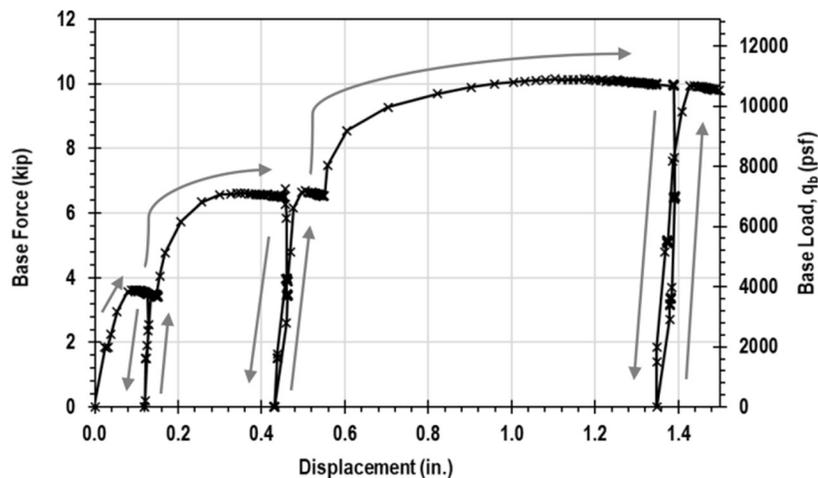


Figura 3-7 Prueba de carga típica que muestra la trayectoria de carga, descarga y recarga. Tomada de Wallace (2019).

3.2 Caracterización de Materiales

El material ensayado corresponde a una arena suelta mal gradada tomada a una profundidad de 4 metros desde la superficie del terreno. El material del suelo que se empleó para el ensayo de laboratorio fue dragado del río Missouri cerca de Jefferson City, Missouri. Para caracterizar el suelo se realizaron pruebas de laboratorio para determinar sus propiedades físicas y mecánicas (Clasificación de suelos, granulometría, peso unitario, ensayo de corte directo, y contenido de humedad).

Para medir la densidad de la arena mal gradada en la cámara de prueba se utilizaron latas de densidad antes de iniciar la prueba. Este registro de densidad se realizó después de aplicar la tensión de sobrecarga al suelo. Al tener el peso de la lata de densidad y dividirlo por el volumen conocido se podía estimar un valor del peso unitario final del suelo. El tamaño de las latas de densidad variaba desde 1,75 a 2,5 pulgadas de diámetro y de 2,5 a 3,5 pulgadas de altura y eran retiradas al finalizar las pruebas durante la fase de excavación. En la figura 3-8 se muestra una de las latas de densidad empleadas en la prueba de laboratorio.



Figura 3-8 Lata de densidad empleada para determinar la densidad final de la arena limpia mal gradada. Tomada de Wallace (2019).

El concreto empleado para la construcción del pilote era de tipo no poroso, y tenía las siguientes propiedades mecánicas: módulo elástico (E) de 4414 ksi (30420000 kN/m²), peso específico (γ_c) de 24 kN/m³ y un coeficiente de poisson de 0,25. La resistencia a la compresión del concreto a los 28 días fue de 5600 psi (38MPa).

3.3 Modelación y Calibración del Modelo Numérico

3.3.1 Modelación Numérica

Para la modelación numérica se empleó un modelo axisimétrico ya que este es apropiado en estructuras con geometría circular como es el caso de los pilotes de sección transversal radial uniforme. El modelo axisimétrico se utiliza en estructuras circulares con una sección transversal radial (más o menos) uniforme, por otra parte, este tipo de modelo genera un esquema de carga alrededor del eje central que permite suponer estados tenso-deformacionales idénticos en cualquier dirección radial. En un análisis axisimétrico, las fuerzas calculadas (Fuerza-X, Fuerza-Y) son aquellas que actúan sobre el contorno de un círculo que abarca un ángulo de 1 radián; por lo tanto, con el fin de obtener las fuerzas correspondientes al problema completo, dichas fuerzas deberán ser multiplicadas por un factor de 2π (Brinkgreve R. , 2004).

El pilote fue modelado con las mismas dimensiones del modelo de la prueba de laboratorio (40,64cm de diámetro y 71,12 cm de alto) como se muestra en la figura 3-9. Así mismo, se estableció que el material del pilote sería concreto reforzado de tipo no poroso, representado con un modelo lineal-elástico. En la tabla 3-1 se presenta cada una de las propiedades mecánicas del pilote modelado en concreto reforzado en el programa Plaxis 2D.

Peso específico (γ_c)	24 kN/m³
Módulo de Elasticidad (E_c)	30420000 kN/m²
Coefficiente de Poisson (ν)	0.25

Tabla 3-1 Propiedades mecánicas del pilote en concreto reforzado empleado para el modelo numérico.

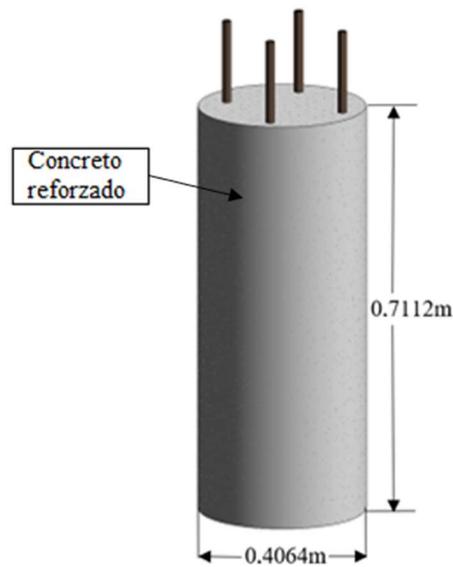


Figura 3-9 Representación gráfica de las dimensiones del pilote modelado en Plaxis 2D.

En la cabeza del pilote, se asignó una placa, para que la carga puntual aplicada en esta fuera uniformemente distribuida y así garantizar que los esfuerzos fueran uniformes. Además, a este pilote se le colocó una interfaz para establecer una división entre el elemento y el suelo, con el fin de considerar la fricción que hay entre el suelo y el pilote, generando así un pequeño plano de falla.

Para la modelación del suelo se utilizará el modelo de plasticidad endurecible de Hardening. Este modelo, se basa en la teoría de la plasticidad en vez de la teoría de la elasticidad, y describe la rigidez del suelo de forma mucha más precisa que el modelo de

Mohr-Coulomb, ya que tiene en cuenta la rigidez que presenta el suelo en las trayectorias de descarga-recarga mediante el módulo elástico Eur. Además, el modelo Hardening Soil considera una relación hiperbólica entre la deformación axial ε_a y una tensión desviadora. Las dimensiones geométricas que se tomaron del suelo fueron, ancho total de 2.0 metros y altura de 4 metros.

Para restringir los desplazamientos del suelo se delimitaron los bordes del modelo geométrico. En la base del suelo se restringieron los desplazamientos verticales y horizontales, y en los contornos laterales se restringieron los desplazamientos horizontales, pero se admitieron las deformaciones verticales.

Al suelo también se le implementó una malla con simetría axial compuesta con elementos triangulares de 15 nodos y con distintos grados de refinamiento. Se utilizó diferentes densidades de malla (ver figura 3-10), delimitando una malla con mayor densidad cerca al pilote para que el enmallado fuera más fino, y se obtuviera una mejor calidad de la información y mejor precisión del modelo. La creación de la malla de deformación del suelo, se realizó por medio de la herramienta “Generate mesh” del programa.

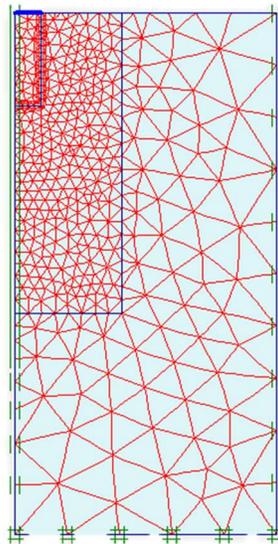


Figura 3-10 Representación gráfica de las mallas empleadas para la modelación del pilote en Plaxis 2D.

En el modelo numérico, también se asignó una carga vertical puntual al pilote. Esta carga se ubicó en el eje del pilote. Además, se incorporó y se varió una sobrecarga de confinamiento al suelo, para así, poder analizar el comportamiento y la relación entre la sobrecarga aplicada al suelo y la rigidez en la punta del pilote. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra el modelo general utilizado en esta investigación.

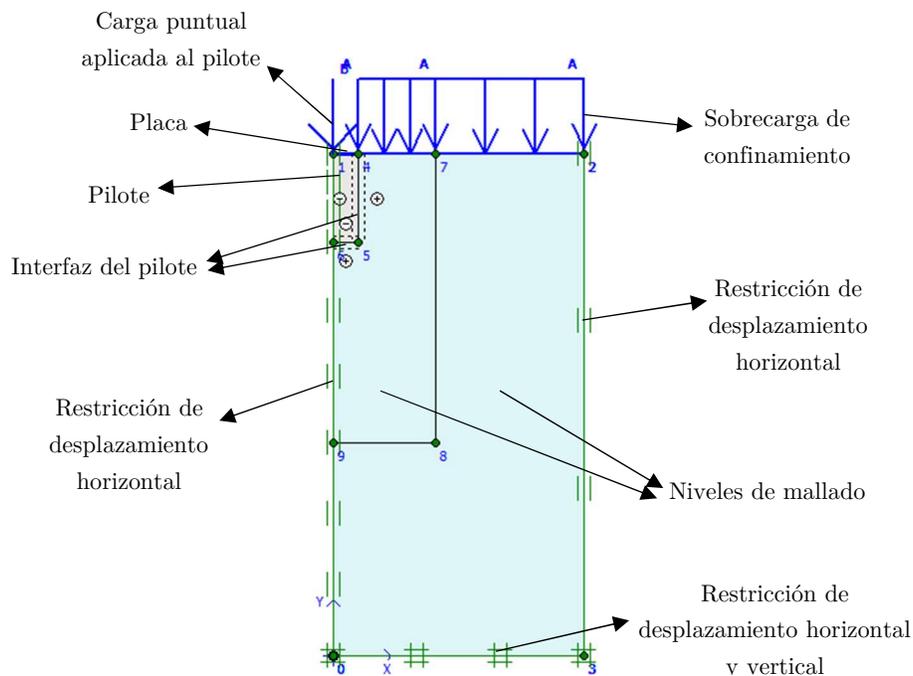


Figura 3-11 Representación gráfica del Modelo suelo-pilote empleado en la investigación.

Las propiedades del suelo fueron asignadas según los resultados de la caracterización geotécnica realizada al material empleado en las pruebas de carga, se consideró que el material trabajaría en una condición drenada, con el modelo constitutivo Hardening Soil (las propiedades del suelo se presentan en la Tabla 3-2).

ARENA SUELTA MAL GRADADA										
Espesor (m)	γ_{sat} ($\frac{kN}{m^3}$)	c ($\frac{kN}{m^2}$)	ϕ (°)	K_0^{nc}	R_f	ψ (°)	V_{ur}	E_{50} ($\frac{kN}{m^2}$)	E_{oed} ($\frac{kN}{m^2}$)	E_{ur} ($\frac{kN}{m^2}$)
4	13.73	14	39	0.6	0.7	0	0.2	7800	7800	95000

Tabla 3-2 Propiedades del suelo empleadas para la modelación numérica.

Para llevar a cabo la modelación, se consideró un análisis por etapas constructivas, con diferentes fases de análisis, A continuación se describen las fases de análisis empleadas: En la primera fase de análisis (Carga) se definió la sobrecarga de confinamiento, en la segunda fase (Reset) se resetearon los desplazamientos a cero, en la tercera fase se aplicó la carga sobre el pilote y se activa la carga que representa el confinamiento del suelo, y luego se iniciaron las fases de carga-descarga hasta llevar el pilote a la falla

Cuando el programa cargó y llevó a cabo todas sus fases, los resultados se visualizaron y se extrajeron del programa *Output*, en el cual fue posible ver la malla de elementos finitos deformada, y obtener la gráfica carga vs deformación con su respectiva tabla de valores.

3.3.2 Calibración del Modelo Numérico

Los parámetros del suelo empleados en el modelo numérico, fueron considerados según los resultados de las pruebas de laboratorio llevadas a cabo en la tesis del ingeniero Wallace (2019), los parámetros fueron ajustados, buscando que las curvas fuerza-deformación obtenidas en las pruebas de laboratorio, coincidieran con las curvas fuerza-deformación obtenidas mediante el modelo numérico. Debido a que no se contó con pruebas triaxiales para definir los módulos de elasticidad del material, se realizaron variaciones en los módulos de elasticidad buscando que se generara un buen ajuste entre los resultados del laboratorio y los resultados arrojados por el Modelo en Elementos Finitos.

A continuación, se presenta la figura 3-12 en la cual se observa la calibración de la curva fuerza-desplazamiento del modelo numérico en Plaxis 2D.

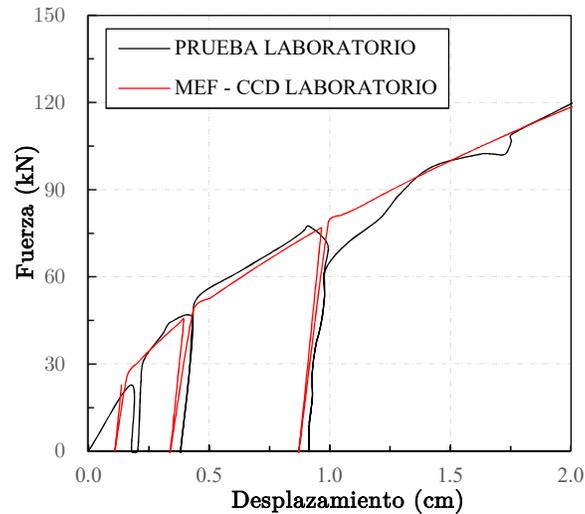


Figura 3-12 Curva fuerza-desplazamiento del modelo numérico VS curva fuerza-desplazamiento prueba de laboratorio.

3.4 Análisis Paramétrico

Para evaluar la relación entre la rigidez del suelo y el desplazamiento de la punta del pilote, se realizó un análisis paramétrico en el cual se consideraron variaciones en la sobrecarga aplicada al suelo y los ciclos de carga-descarga aplicados al pilote. Se varía la sobrecarga de confinamiento en 4 casos de estudios (ver tabla 3-3), y adicionalmente se implementa diferentes ciclos de carga en cada caso.

La rigidez se calculó mediante una relación entre la fuerza aplicada al pilote y el desplazamiento. Esto se realizó con el objetivo de estudiar y analizar la rigidez en la punta del elemento, cuando este, se encuentra sometido a diferentes sobrecargas de confinamiento. En la figura 3-13 se presenta los diferentes casos de análisis empleados, y el procedimiento empleado para el análisis paramétrico.

Caso	Descripción
Caso 1 a)	Confinamiento 10PSI, ciclos de carga-descarga cada 10 kN.
Caso 1 b)	Confinamiento 10PSI, ciclos de carga-descarga cada 15 kN.
Caso 2 a)	Confinamiento 20PSI, ciclos de carga-descarga cada 10 kN.
Caso 2 b)	Confinamiento 20PSI, ciclos de carga-descarga cada 15 kN.
Caso 2 c)	Confinamiento 20PSI, ciclos de carga-descarga cada 20 kN.
Caso 3 a)	Confinamiento 30PSI, ciclos de carga-descarga cada 15 kN.
Caso 3 b)	Confinamiento 30PSI, ciclos de carga-descarga cada 30 kN.
Caso 3 c)	Confinamiento 30PSI, ciclos de carga-descarga cada 40 kN.
Caso 4 a)	Confinamiento 40PSI, ciclos de carga-descarga cada 15 kN.
Caso 4 b)	Confinamiento 40PSI, ciclos de carga-descarga cada 30 kN.
Caso 3 c)	Confinamiento 40PSI, ciclos de carga-descarga cada 40 kN.

Tabla 3-3 Casos de estudio analizados en el modelo numérico.

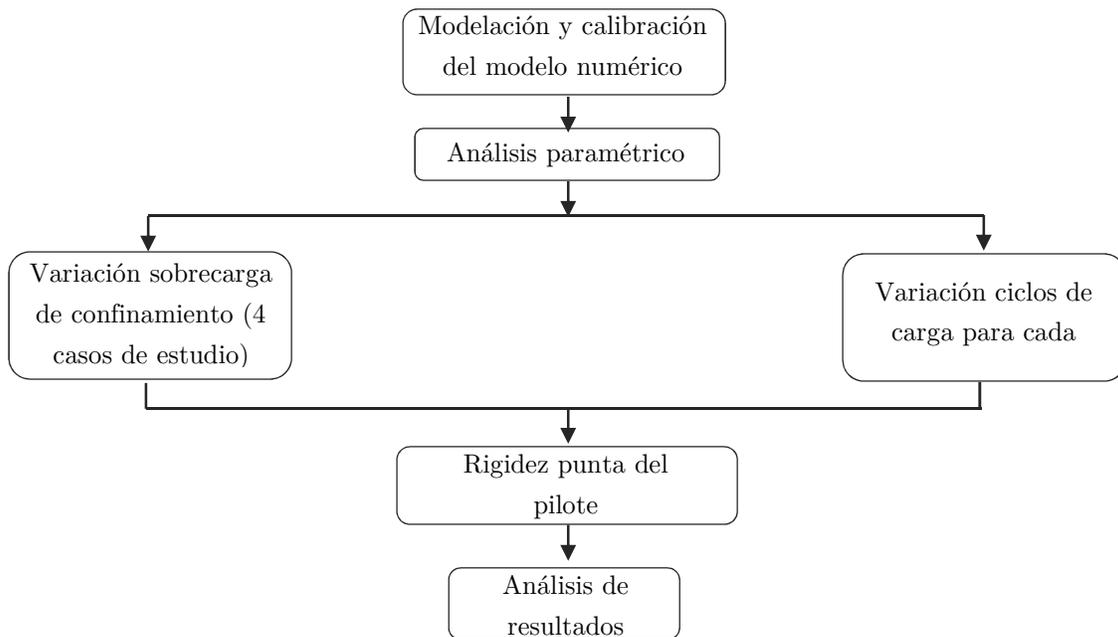


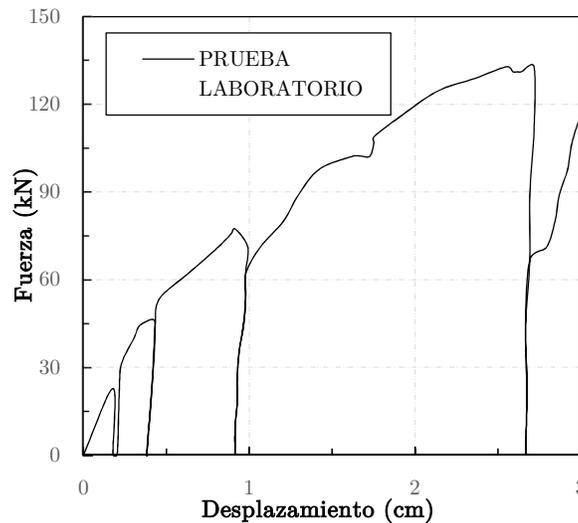
Figura 3-13 Diagrama de flujo Análisis Paramétrico.

3.4.1 Caso 1 –Pilote con confinamiento de 10 PSI

Se realizaron diferentes ciclos de carga para un pilote con confinamiento de 10 PSI, manteniendo las otras propiedades del modelo calibrado sin modificar. Se obtienen 2 casos de análisis, el modelo calibrado, con ciclo de carga cada 10kN y 15kN como se observa en la tabla 3-4. Los casos analizados fueron comparados con los resultados de la prueba de laboratorio realizada con un confinamiento de 10PSI.

Caso 1 – Confinamiento 10 PSI	
Ciclos de carga	Arena suelta mal gradada Propiedades sin modificar
Caso 1a). MEF Ciclo de carga-descarga cada 10kN (CCD-10kN)	$E_{50} = 7800 \text{ kPa}$ $C = 14 \text{ kP}$ $\text{Angulo de friccion}(\text{°}) = 39$
Caso 1b). MEF Ciclo de carga-descarga cada 15kN (CCD-15kN)	$R_f = 0.7$ $E_{oed} = 7800$ $E_u = 95000$ $k_o = 0,6$

Tabla 3-4 Variación ciclos de carga caso No. 1



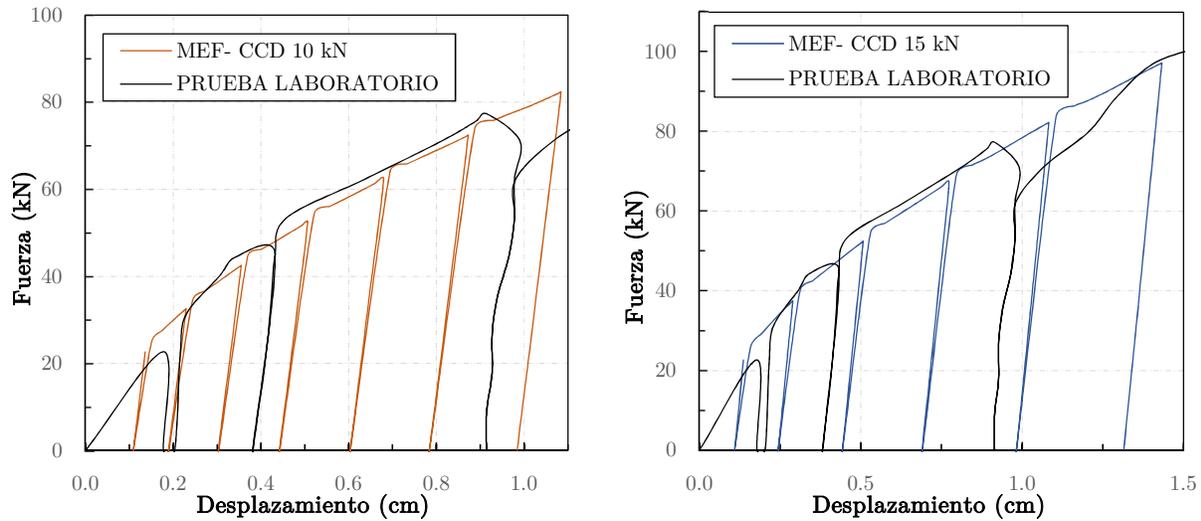


Figura 3-14 Curva fuerza-desplazamiento del modelo numérico y los diferentes ciclos de carga realizados con confinamiento de 10 PSI

La figura 3-14 presenta las curvas fuerza-desplazamiento para diferentes intervalos de carga-descarga. en cada ciclo de carga realizado se procede a calcular la rigidez en cada uno de ellos, determinando la relación entre la fuerza aplicada en el pilote y su desplazamiento final en cada ciclo de carga-descarga. Para el primer punto de la gráfica fuerza-desplazamiento del modelo numérico, se tiene un desplazamiento en el ciclo de carga de 0,13cm, con una fuerza en la parte de carga de 22,62 kN (5,085 kips), con estos valores se procede a calcular su respectiva rigidez:

$$Rigidez = \frac{Fuerza}{Desplazamiento}$$

$$Rigidez = \frac{22,62 \text{ kN}}{0,14 \text{ cm}}$$

$$Rigidez = 161,57 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}$$

Esto se realiza con cada ciclo de carga y en la figura 3-15 se presenta el resumen de las variaciones de la rigidez en función del nivel de desplazamiento para diferentes ciclos de carga-descarga y valores de confinamiento.

Para cada ciclo de carga se determina la rigidez alcanzada por el modelo numérico, y estos resultados, son comparados con los resultados de las pruebas de carga realizadas en laboratorio. Se puede observar una conducta descendente en cada gráfica, donde a medida que aumenta el desplazamiento la rigidez disminuye.

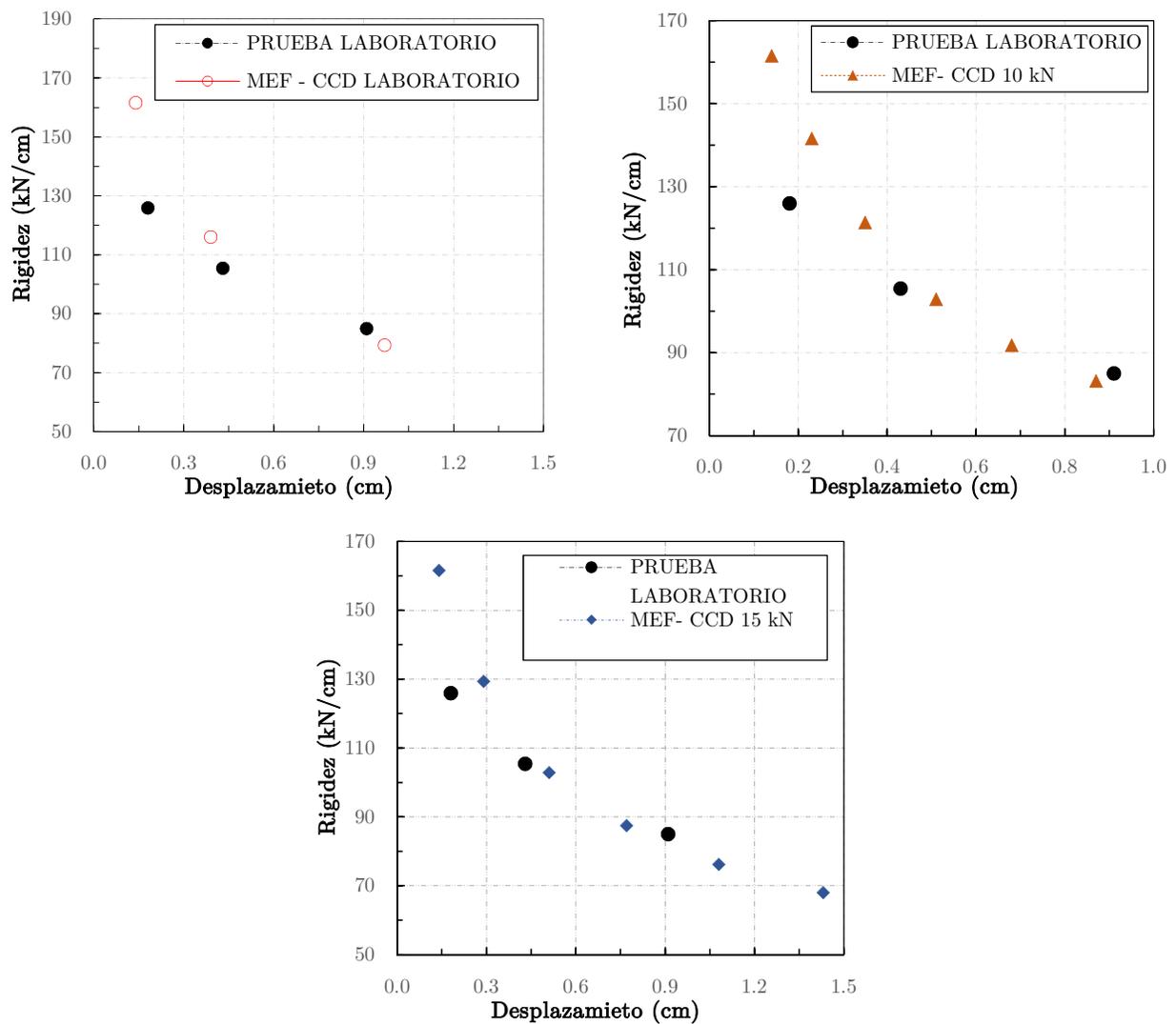


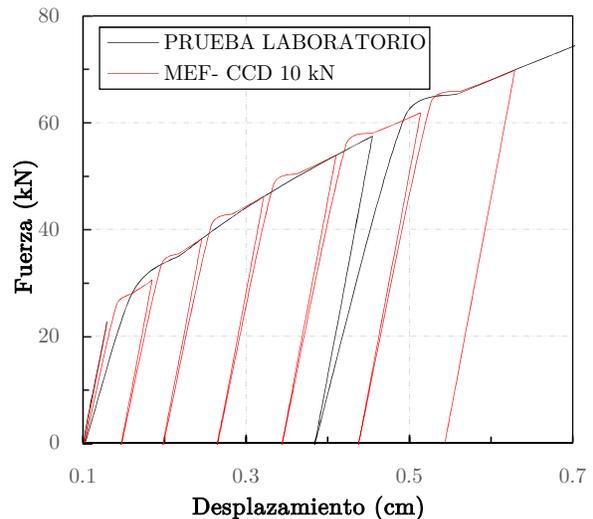
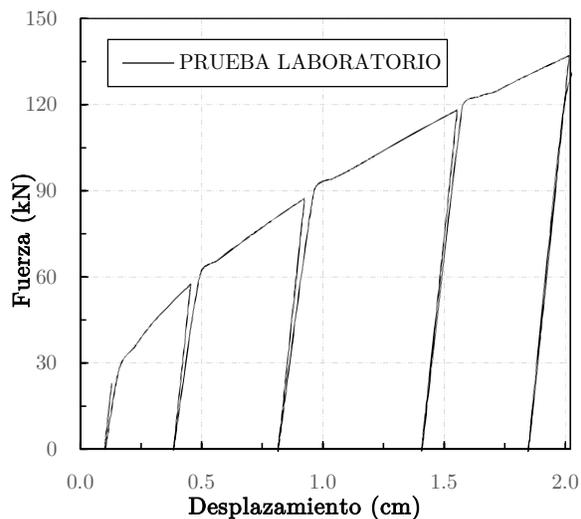
Figura 3-15 Rigidez de los diferentes ciclos de carga vs. Desplazamiento en la punta del pilote caso No. 1

3.4.2 Caso 2 –Pilote con confinamiento de 20 PSI

Se realizaron diferentes ciclos de carga para un pilote con confinamiento de 20 PSI, manteniendo las otras propiedades del modelo calibrado sin modificar. Se obtienen 3 casos de análisis: el modelo calibrado, con ciclo de carga cada 10kN, 15kN y 20kN como se observa en la tabla 3-5. Los casos analizados fueron comparados con los resultados de la prueba de laboratorio realizada con un confinamiento de 20PSI.

Caso 2 – Confinamiento 20 PSI	
Ciclos de carga	Arena suelta mal gradada
Caso 2a). MEF Ciclo de carga-descarga cada 10kN (CCD-10kN)	Propiedades sin modificar
Caso 2b). MEF Ciclo de carga-descarga cada 15kN (CCD-15kN)	$E_{50} = 7800 \text{ kPa}$
Caso 2c). MEF Ciclo de carga-descarga cada 20kN (CCD-20kN)	$C = 14 \text{ kP}$
	$Ang = 39$
	$Rf = 0.7$
	$E_{oed} = 7800$
	$Eu = 95000$
	$ko = 0,6$

Tabla 3-5 Variación ciclos de carga caso No. 2



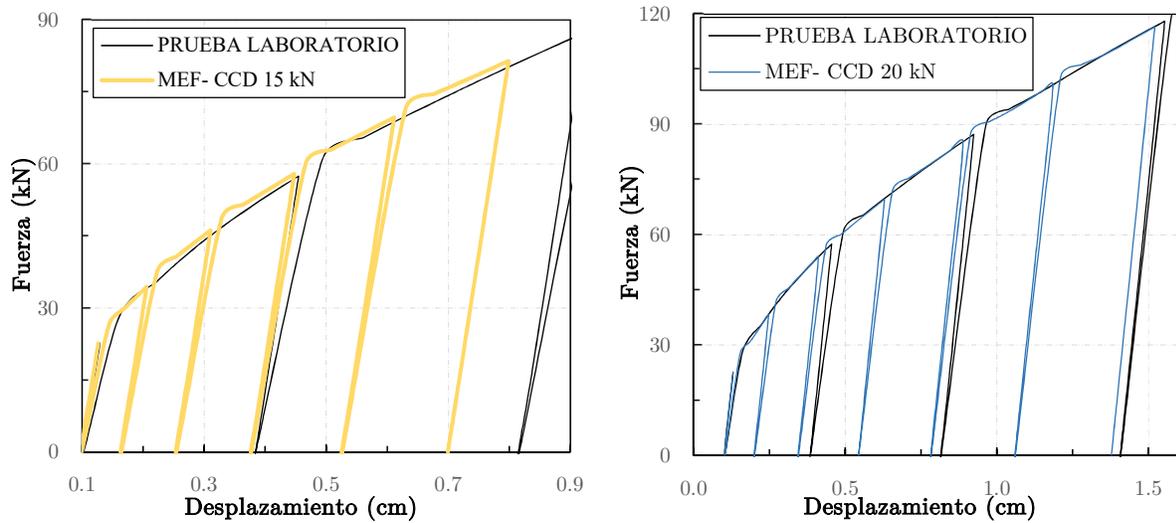
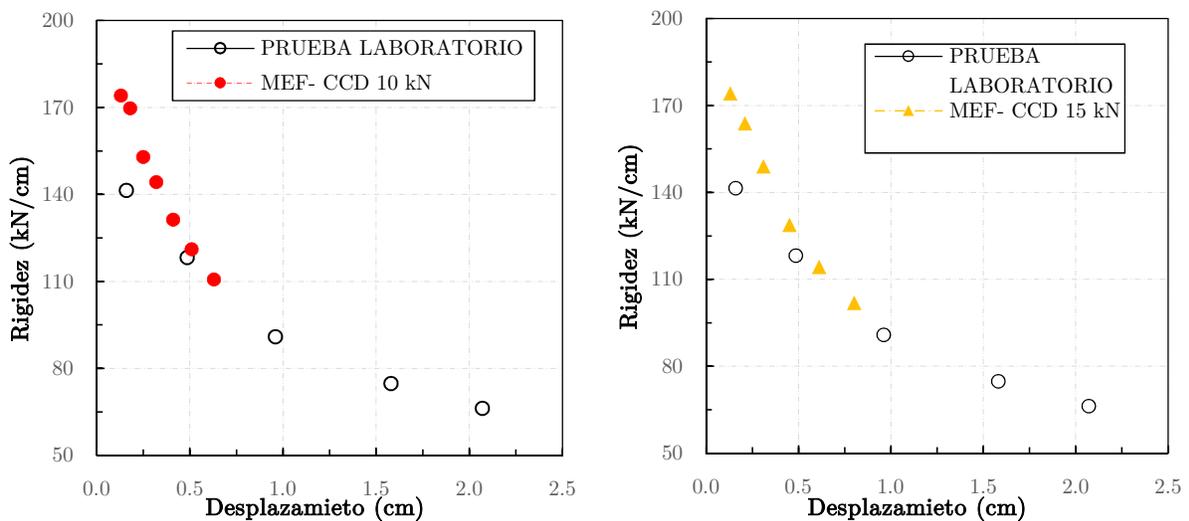


Figura 3-16 Curva fuerza-desplazamiento del modelo numérico y los diferentes ciclos de carga realizados con confinamiento de 20 PSI

Con la figura 3-16, donde se obtienen las curvas fuerza-desplazamiento de cada ciclo de carga realizado, y se procede a calcular la rigidez en cada uno de ellos. Para esto se calcula la relación entre la fuerza aplicada en el pilote y su desplazamiento en cada ciclo de carga y descarga, como se explicó en el ítem 3.4.1 Caso 1 –Pilote con confinamiento de 10 PSI.



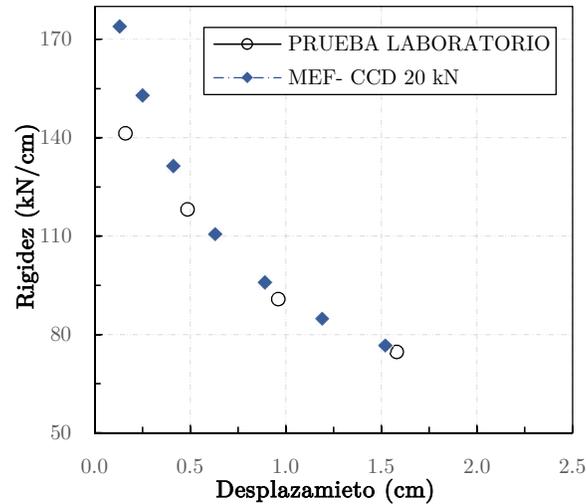


Figura 3-17 Rigidez de los diferentes ciclos de carga vs. Desplazamiento en la punta del pilote caso No. 2

En la figura 3-17 se presenta la gráfica Rigidez – Desplazamiento que ocurre en la punta del pilote, donde se muestran los diferentes ciclos de carga realizados. Para cada ciclo de carga se determina la rigidez, se decide graficar con respecto al modelo numérico calibrado para analizar el comportamiento que se tiene entre ambos. Se observa que en todos los ciclos de carga-descarga la conducta es descendente, a medida que aumenta el desplazamiento la rigidez disminuye.

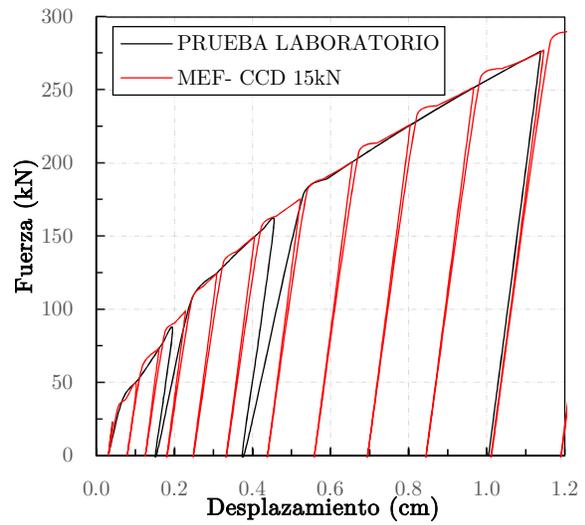
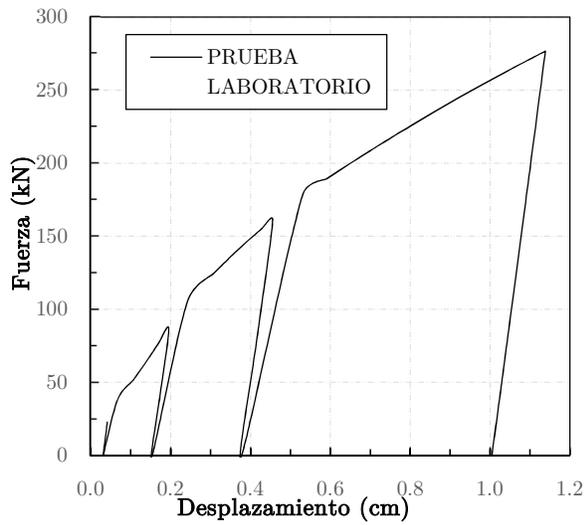
3.4.3 Caso 3 –Pilote con confinamiento de 30 PSI

Se realizaron diferentes ciclos de carga para un pilote con confinamiento de 30 PSI, manteniendo las otras propiedades del modelo calibrado sin modificar. Se obtienen 3 casos de análisis: el modelo calibrado, con ciclo de carga cada 15kN, 30kN y 40kN como se observa en la tabla 3-6. Los casos analizados fueron comparados con los resultados de la prueba de laboratorio realizada con un confinamiento de 30PSI.

Caso 3 – Confinamiento 30 PSI

Ciclos de carga	Arena suelta mal gradada
Caso 3a). MEF Ciclo de carga-descarga cada 15kN (CCD-15kN)	Propiedades sin modificar $E_{50} = 7800 \text{ kPa}$ $C = 14 \text{ kP}$ $Ang = 39$ $Rf = 0.7$ $E_{oed} = 7800$ $E_u = 95000$ $ko = 0,6$
Caso 3b). MEF Ciclo de carga-descarga cada 30kN (CCD-30kN)	
Caso 3c). MEF Ciclo de carga-descarga cada 40kN (CCD-40kN)	

Tabla 3-6 Variación ciclos de carga caso No. 3



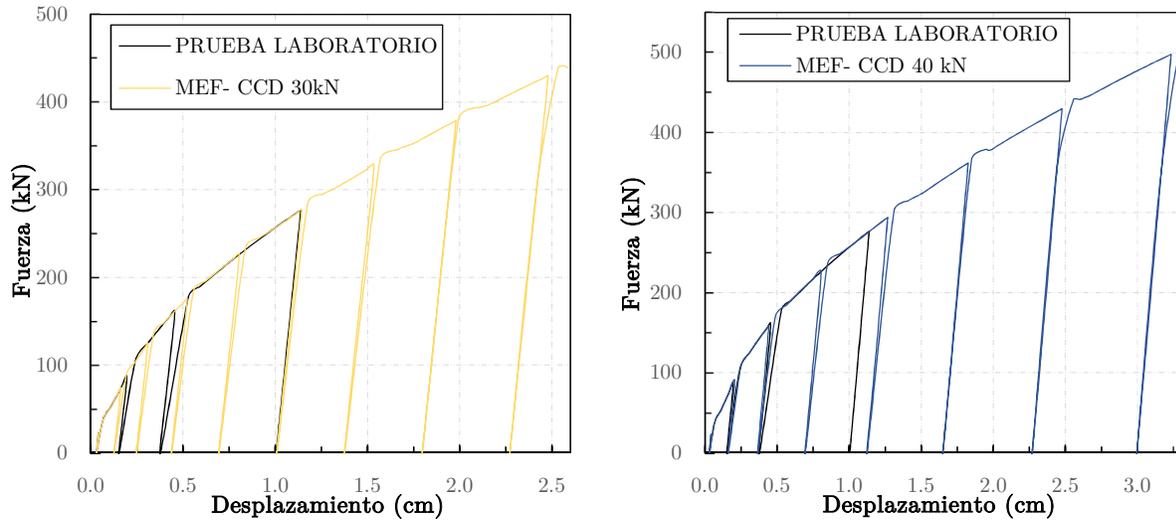
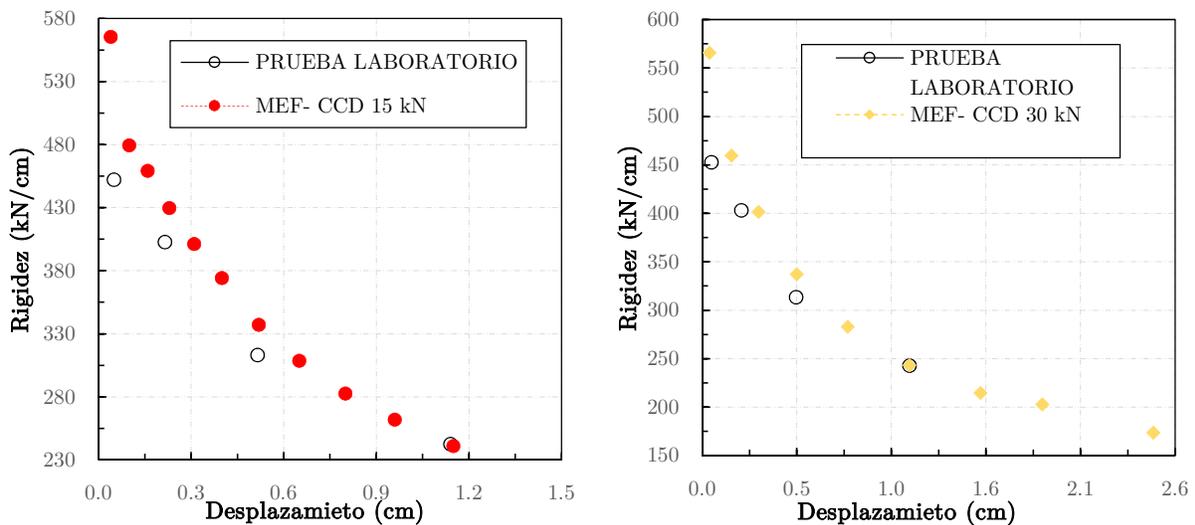


Figura 3-18 Curva fuerza-desplazamiento del modelo numérico y los diferentes ciclos de carga realizados con confinamiento de 30 PSI

Con la figura 3-18, donde se obtienen las curvas fuerza-desplazamiento de cada ciclo de carga realizado, se procede a calcular la rigidez en cada uno de ellos, para esto se calcula la relación entre la fuerza aplicada en el pilote y su desplazamiento en cada ciclo de carga y descarga, como se explicó en el ítem 3.4.1 Caso 1 –Pilote con confinamiento de 10 PSI.



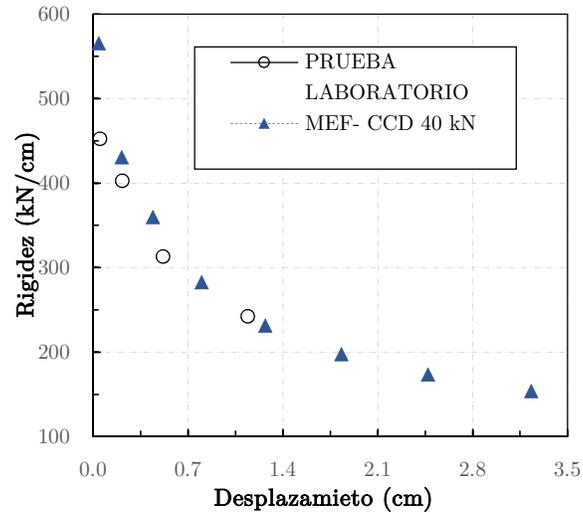


Figura 3-19 Rigidez de los diferentes ciclos de carga vs. Desplazamiento en la punta del pilote caso No. 3

En la figura 3-19 se presenta la gráfica Rigidez – Desplazamiento que ocurre en la punta del pilote, donde se muestran los diferentes ciclos de carga realizados.

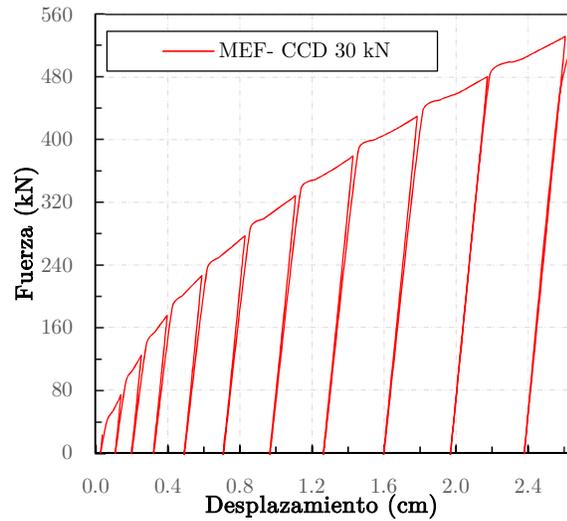
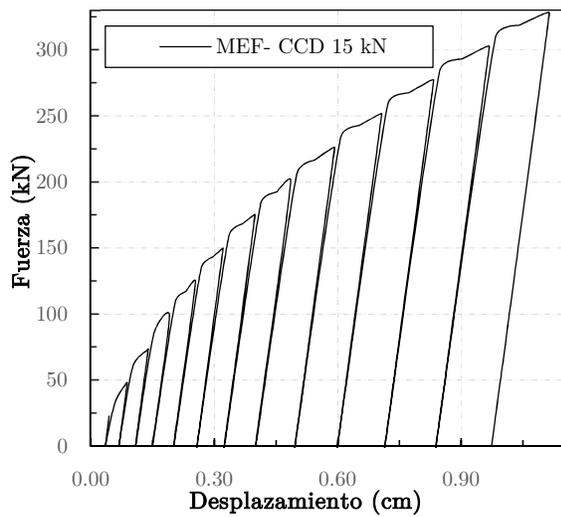
Para cada ciclo de carga se determina la rigidez, se decide graficar con respecto al modelo numérico calibrado para analizar el comportamiento que se tiene entre ambos. Se puede observar una conducta descendente en cada gráfica, donde a medida que aumenta el desplazamiento la rigidez disminuye.

3.4.4 Caso 4 –Pilote con confinamiento de 40 PSI

Se realizaron diferentes ciclos de carga para un pilote con confinamiento de 40 PSI, manteniendo las otras propiedades del modelo calibrado sin modificar. Se obtienen 3 casos de análisis: Ciclo de carga cada 15kN, 30kN y 40kN como se observa en la tabla 3-7. Se decide realizar este cuarto caso con confinamiento de 40 PSI para observar y analizar de manera más detallada el comportamiento de la rigidez, estos resultados se compararán entre ellos, ya que no se tiene un modelo guía.

Caso 4 – Confinamiento 40 PSI	
Ciclos de carga	Arena suelta mal gradada
Caso 4a). MEF Ciclo de carga-descarga cada 15kN (CCD-15kN)	Propiedades sin modificar
	$E_{50} = 7800 \text{ kPa}$
	$C = 14 \text{ kP}$
	$Ang = 39$
	$R_f = 0.7$
	$E_{oed} = 7800$
	$E_u = 95000$
	$k_o = 0,6$
Caso 4b). MEF Ciclo de carga-descarga cada 30kN (CCD-30kN)	
Caso 4c). MEF Ciclo de carga-descarga cada 40kN (CCD-40kN)	

Tabla 3-7 Variación ciclos de carga caso No. 4



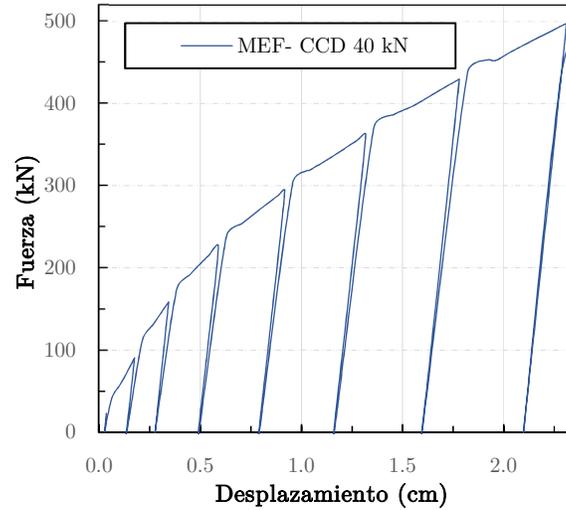
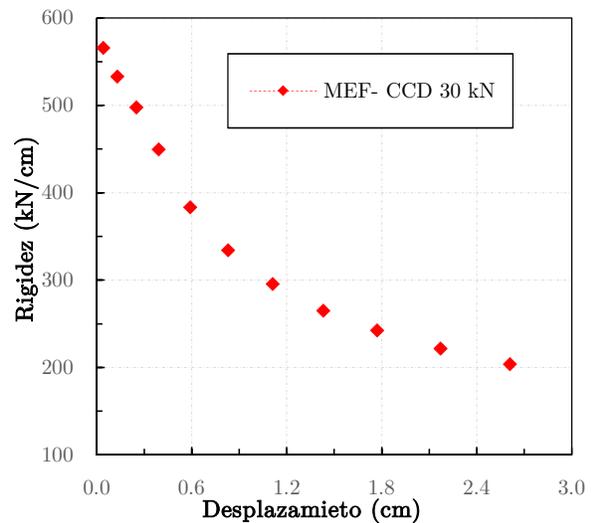
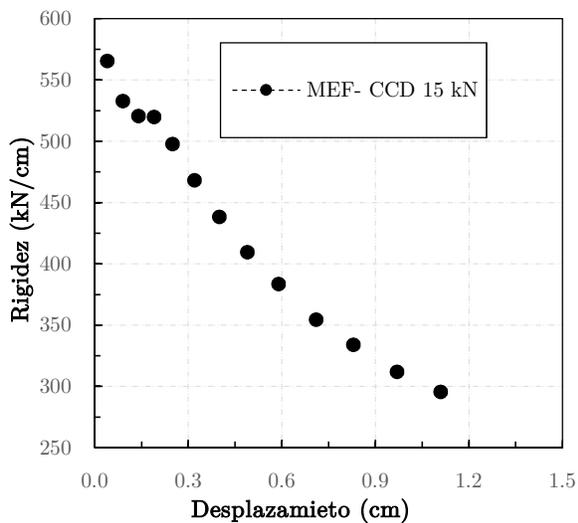


Figura 3-20 Curva fuerza-desplazamiento del modelo numérico y los diferentes ciclos de carga realizados con confinamiento de 40 PSI

Con la figura 3-20, donde se obtienen las curvas fuerza-desplazamiento de cada ciclo de carga realizado se procede a calcular la rigidez en cada uno de ellos, para esto se calcula la relación entre la fuerza aplicada en el pilote y su desplazamiento en cada ciclo de carga y descarga, como se explicó en el ítem 3.4.1 Caso 1 –Pilote con confinamiento de 10 PSI.



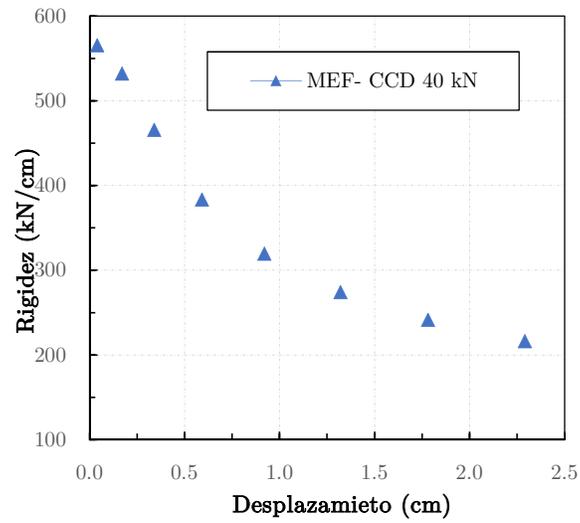


Figura 3-21 Rigidez de los diferentes ciclos de carga vs. Desplazamiento en la punta del pilote caso No. 4

Capítulo 4

4. Análisis de Resultados

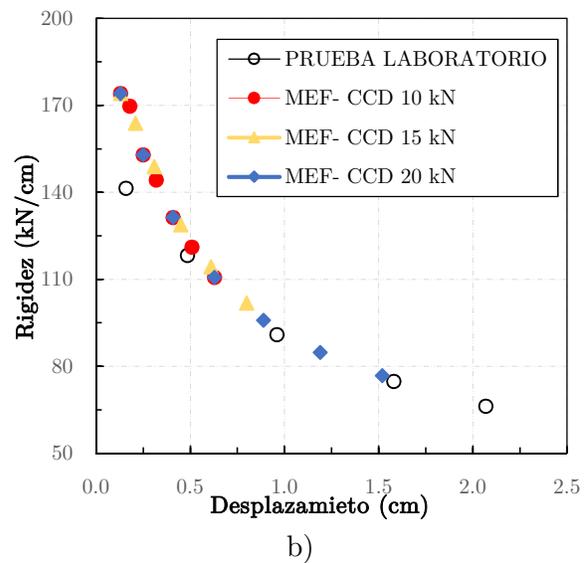
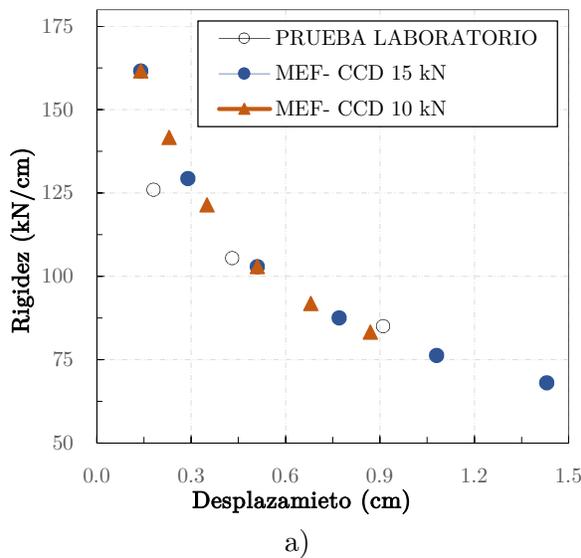
Se realizó un análisis paramétrico variando la sobrecarga de confinamiento aplicada al suelo. Los valores de sobrecarga de confinamiento que se evaluaron fueron 10 PSI, 20 PSI, 30 PSI y 40 PSI. A cada uno de estos casos de estudio también se le realizó variaciones en sus ciclos de carga-descarga. Para una sobrecarga de 10 PSI, se evaluó la rigidez en la punta del pilote con ciclos de carga cada 10 y 15kN. El segundo caso (20 PSI) toma ciclos de carga cada 10, 15 y 20kN y para sobrecargas de 30 y 40PSI los ciclos de carga se realizan cada 15, 30 y 40 kN.

Los resultados del modelo numérico muestran una disminución de la rigidez del pilote con el aumento del desplazamiento, como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Al comparar los resultados del modelo numérico con los resultados experimentales, se encontró un buen ajuste en los datos, ya que en ambos resultados la rigidez de suelo presenta un comportamiento exponencial descendente, donde inicialmente la rigidez del suelo fue grande a bajos desplazamientos e iba disminuyendo a medida que el desplazamiento aumentaba.

La tendencia en los datos de la **Figura 4-1** evidencia lo mencionado anteriormente, donde, a medida que aumenta el rango del ciclo de carga-descarga (10 kN, 15 kN, 20 kN,30 kN y 40 kN), la rigidez en la punta del pilote va disminuyendo debido al aumento progresivo de la carga aplicada al pilote y el desplazamiento que padece el suelo. Los puntos que se tomaron para evaluar la rigidez en la punta del pilote y su comportamiento correspondían al inicio de la descarga de cada ciclo. Para ciclos de carga-descarga y recarga axial cada 10 kN con una sobrecarga de 10PSI, se evaluaron 6 puntos, en los cuales la rigidez inicial en la punta del pilote fue de 161,57 kN/cm y esta iba disminuyendo hasta llegar a un valor de 83,2 kN/cm. Así mismo, para ciclos de carga-descarga y recarga axial cada 15 kN, con un mismo valor de sobrecarga de 10 PSI, el valor de la rigidez disminuyó hasta

un valor de 68kN/cm. La diferencia de los resultados entre cada rango de ciclo se debe al aumento de carga que hay entre estos, y al aumento del desplazamiento generado en el suelo.

Para una sobrecarga de 20PSI la rigidez en la punta del pilote disminuyó desde 174 kN/cm hasta 76,68 kN/cm. El valor mínimo de la rigidez en la punta del pilote se obtuvo con ayuda de los ciclos de carga cada 20kN, pues permitían evaluar puntos en los cuales la fuerza axial aplicada y el desplazamiento del suelo era mayor a los demás puntos evaluados (con 10kN y 15kN). Para el caso en el que suelo tiene una sobrecarga de 30PSI se obtuvo un valor inicial máximo de rigidez en la punta del pilote de 565,5 kN/cm hasta llegar a un valor de 154,1 kN/cm, esta gran diferencia entre la rigidez inicial y final evaluada en la punta del pilote, se debe al incremento en la cantidad y el rango de los ciclos de carga. Por último, en el caso de sobrecarga de 40 PSI, se identificó que tenía el mismo valor inicial de rigidez que para 30 PSI (565,5 kN/cm), sin embargo, se llegó hasta un valor de rigidez en la punta del pilote 216,44 kN/cm.



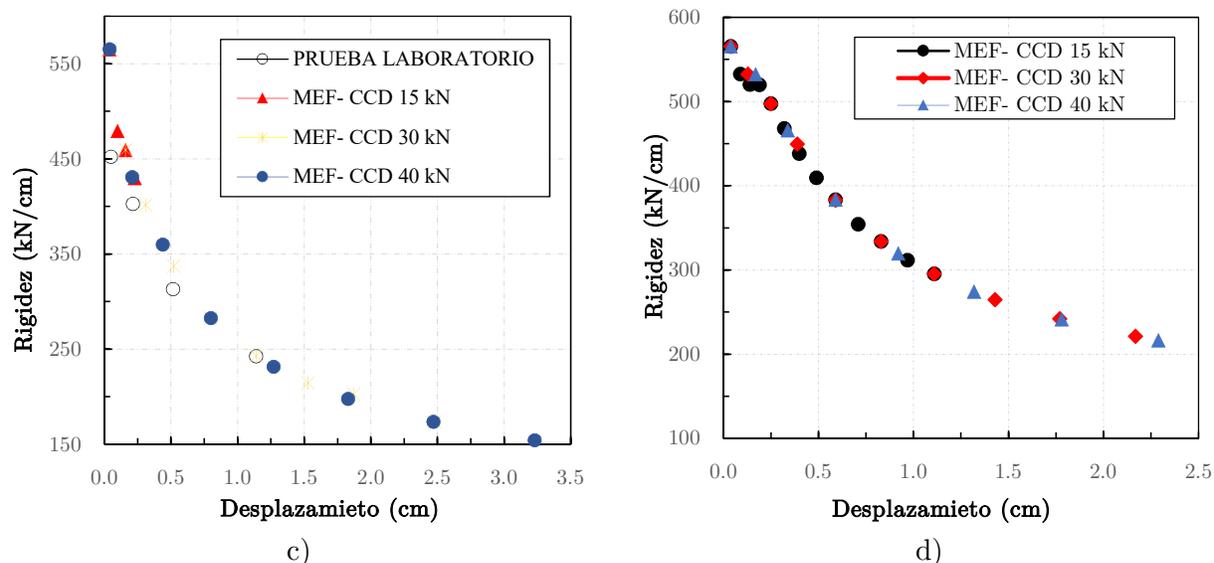


Figura 4-1 Variación de la rigidez vs. Desplazamiento. a). Confinamiento 10 PSI; b). Confinamiento 20 PSI; c). Confinamiento 30 PSI; d). Confinamiento 40 PSI.

En la **figura 4-2** se presenta una síntesis de resultados de la rigidez del pilote sometido a distintos niveles de sobrecarga (10PSI, 20PSI, 30PSI, 40PSI). Los esfuerzos de sobrecarga aplicados al pilote se detallan con diferentes símbolos. Según lo obtenido se puede observar que la sobrecarga de confinamiento empleada durante las pruebas mostró un impacto significativo en la rigidez en la punta del pilote. Los resultados mostraron que en suelos con presencia de un alto nivel confinamiento, se pierde menor rigidez una vez que aumenta el desplazamiento. Así mismo, a medida que disminuyen los valores de sobrecarga (10 y 20 PSI) la pérdida de la rigidez es mayor y tiende a ser constante.

Lo anterior se puede evidenciar evaluando la rigidez en un rango de desplazamiento de 0-1.5cm, en el cual la rigidez inicial para una sobrecarga de 40 PSI, fue de 565,5 kN/cm llegando hasta un valor de 264,95 kN/cm. Con este análisis, se identificó que al llegar a un desplazamiento de 1,5 cm el suelo pierde un 53% de su rigidez inicial; en comparación a un suelo con una sobrecarga de 20 PSI, quien inicialmente tiene una rigidez de 174 kN/cm y al llegar a una deformación de 1,5 cm, la rigidez disminuye a 76,68 kN/cm, perdiendo así el 56% de su rigidez inicial.

Cabe destacar que estos valores de rigidez en la punta del pilote varían significativamente puesto que con una sobrecarga de 10 y 20 PSI inicialmente se tienen desplazamiento de 0,14 y 0,13cm respectivamente, mientras que para 30 y 40 PSI se tiene que el menor desplazamiento que sufre el suelo es de 0,04cm a una misma carga axial de 22,62 kN. Esto indica, que, a mayor sobrecarga de confinamiento aplicada al pilote, el suelo tendrá un desplazamiento menor.

Para la prueba de carga realizada con una sobrecarga de 40PSI, se alcanzaron valores de rigidez de hasta 565,5 kN/cm, mientras que en la prueba aplicada con 10 PSI de sobrecarga de confinamiento se obtuvo una rigidez máxima del pilote de 161,57 kN/cm, es decir, para sobrecargas de 10 PSI, el suelo alcanza solamente el 28,57% de la rigidez máxima obtenida con una sobrecarga de 40 PSI.

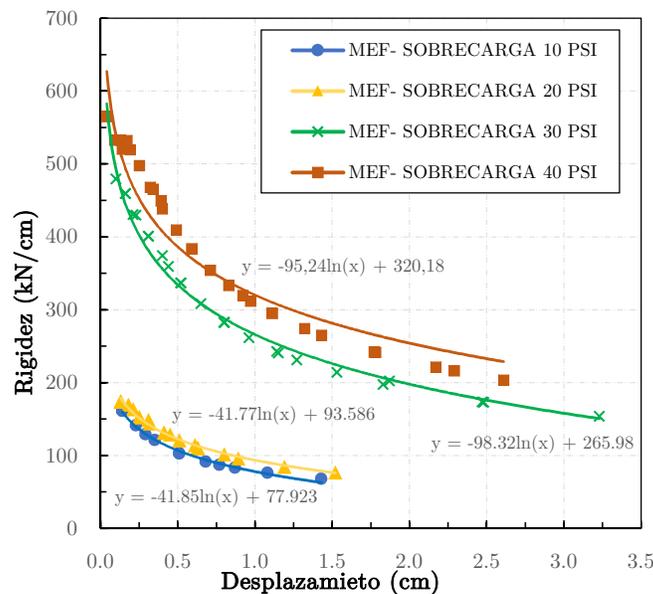


Figura 4-2 Rigidez en la punta del pilote con diferentes sobrecargas de confinamiento.

En la **figura 3-12**, en donde se presenta la gráfica fuerza vs desplazamiento, se logró identificar que la capacidad en la punta del pilote tiene un comportamiento hiperbólico

creciente, en la cual en un principio la pendiente del ciclo de carga es mucho mayor en comparación a la de los ciclos de carga-descarga posteriores. Además, se observa que la capacidad del pilote está directamente relacionada con el nivel de deformación, es decir, al ir aumentando las deformaciones, la capacidad del pilote también aumenta. Cabe destacar, que un principio el suelo cuenta con un determinado nivel de rigidez y módulo de elasticidad que va variando a medida que se van generando las deformaciones.

Capítulo 5

5. Conclusiones

- Las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas en pruebas de carga en pilotes sometidos a diferentes condiciones de carga, permiten al ingeniero geotecnista predecir la interacción suelo-pilote. Los resultados de esta investigación, mostraron que la rigidez del suelo en la punta del pilote, se encuentra directamente relacionada con el nivel de confinamiento del suelo, es decir, a mayor confinamiento, mayor es la rigidez del suelo ante ciclos de carga-descarga.
- Se concluye que a medida que aumenta el desplazamiento del pilote, la rigidez del suelo disminuye, esta situación se presenta, debido al comportamiento no lineal del suelo cuando se encuentra sometido a ciclos de carga-descarga.
- Al comparar las gráficas rigidez vs desplazamiento obtenidas a partir de la calibración del modelo numérico con las del ensayo de laboratorio, se evidencia que ambas tienen un comportamiento logarítmico descendente, puesto que la rigidez del pilote fue inicialmente grande a bajos desplazamientos y esta iba disminuyendo a medida que el desplazamiento del suelo aumentaba. Con esto, se validó que la modelación numérica realizada proporciona un medio razonable para examinar la respuesta fuerza-deformación de la arena suelta pobremente gradada ensayada en las pruebas de carga.

- En el presente trabajo de investigación se desarrolló la modelación y calibración numérica en el programa Plaxis 2D de un pilote sometidos a ciclos de carga-descarga y recarga. Las pruebas realizadas en el software dieron resultados que permitieron graficar las curvas fuerza vs deformación, y que, al compararlas con las obtenidas en el ensayo de laboratorio, demostraron que el programa de elementos finitos cumple con las mismas necesidades y soluciones del aparato experimental creado en laboratorio. Por lo anterior, se puede considerar a Plaxis 2D como una herramienta apta para la modelación de pilotes.

- El análisis realizado por medio del programa de elementos finitos Plaxis 2D, fue de gran ayuda e importancia en el presente trabajo de investigación, pues nos permitió modelar con gran facilidad y obtener resultados aproximados a del ensayo de laboratorio. Actualmente, y gracias a los avances tecnológicos, la modelación por medio de software de elementos finitos constituye una herramienta sólida para resolver diferentes problemas que se presentan en cimentaciones profundas ya que se alcanza una mejor comprensión del comportamiento del pilote. Además, este sistema de modelación trae consigo grandes ventajas económicas, pues permite un gran ahorro al no tener que realizar montajes de equipos y también permite que los resultados se obtengan en un lapso de tiempo más corto.

BIBLIOGRAFÍA

Alvarez Pedraza, J. (2015). *Definición de Coeficientes de Balasto para el Diseño de Fundaciones*.

Alvarez Pedraza, J. (s.f.). *Definición de Coeficientes de Balasto para el Diseño de Fundaciones*.

Arqzon, R. d. (2021). *Construcción , 5 Tipos de cimentaciones más usadas*. Obtenido de <https://arqzon.com.mx/2021/01/06/5-tipos-de-cimentaciones-mas-usadas/>

Bentley. (2011). *PLAXIS -Proyectos de geoingeniería simplificados*. Obtenido de <https://www.bentley.com/es/products/product-line/geotechnical-engineering-software/plaxis-2d>

Brinkgreve, R. (2004). *Plaxis Manual de referencia versión 8*.

Brinkgreve, R., Kumarswamy, S., & Swolfs, W. (2015). *PLAXIS*. Netherlands: Delft University of Technology & PLAXIS bv. Obtenido de Wilde PDSVISION: <https://wildeanalysis.co.uk/software/built-environment/plaxis/>

Caballero, C. R. (Marzo de 2007). *Evaluación Numerico Experimental del Comportamiento Bajo Carga Axial de Pilotes*.

Caballero, C., & Prato, C. (2007). *Criterio de Máxima Frecuencia para la Determinación de la Rigidez Estática Inicial de Pilotes*. Cordoba: Mecanica computacional Vol XXVI, pp 2353 - 2368.

Caballero, K. R. (2007). *Pruebas de Carga en Cimentaciones Profundas Bajo Carga Axial de Pilotes*. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Cordoba.

Carrera, P. F. (26 de Marzo de 2021). *MTP San Luis*. Obtenido de <http://www.adocac.mx/web/images/descargas/cimentacion-2.pdf>

- CFT & Asociados. (9 de 10 de 2009). *Ensayos y pruebas de pilotes*. Obtenido de <https://fernandeztadeo.com/WordPress/?p=293>
- Cortequipos. (19 de Diciembre de 2019). *Cimentaciones profundassus diferentes tipos y usos*. Obtenido de <https://cortequipos.com/pilotes-y-cimentaciones/cimentaciones-profundas/>
- Cortinez, V., & Giron, P. (2005). *El método de los elementos finitos en la ingeniería práctica*.
- Das, B. M. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones-séptima edición*. Cengage learning.
- DAS, B. M. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones-séptima edición*. Cengage learning.
- Dias, T. G., & Bezuijen, A. (Enero de 2018). *Load-Transfer Method for Piles under Axial Loading and Unloading*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/320584121_Load-Transfer_Method_for_Piles_under_Axial_Loading_and_Unloading
- Diaz, E. G. (2013). Método simplificado para la estimación de la carga última de pilotes sometidos a carga vertical axial en arenas. *Dyna*.
- Gavin, K., & Lehane , B. (2007). *Base load - displacement response of piles in sand*. Canadian Geotechnical Journal.
- Gavin, k., & Lehane, B. (2007). Base load – displacement response of piles in sand. *Canadian Geotechnical Journal*.
- Gelacio, J. (2012). *Método de los Elementos Finitos Aplicados a la Solución de Problemas de la Ingeniería Estructural*.
- Geotecnia. (s.f.). *Estudio Geotécnico / Importancia de un buen Estudio de Suelos*. Obtenido de <https://www.geotecnia.online/estudio-geotecnico-importancia-de-un-buen-estudio-de-suelos/?reload=280868>

- Gil Lablanca, R. (s.f.). *Pruebas de Carga en Cimentaciones Profundas*. Rodio Kronsa. Departamento técnico.
- Gutierrez, D. A. (2019). *Guía para el control y seguimiento de las Cimentaciones profundas*. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/24115/1/PROYECTO%20DE%20GRADO%20GUIA%20PARA%20EL%20CONTROL%20Y%20SEGUIMIEN TO%20DE%20LAS%20%E2%80%9CCIMENTACIONES%20PROFUNDAS%20Y%20EN%20LA%20EJECUCI%C3%93N%20.pdf>
- Herrera Suarez, M., Gonzalez Cueto, O., Iglesias Coronel, C., De La Rosa Andino, A., & Madruga Hernandez, R. (2010). *Estudio de la exactitud del modelo hiperbólico de Duncan y Chan en la predicción de la relación esfuerzo deformación de tres suelos arcillosos cubanos*. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, Vol. 19, No. 4.
- Hurtado, J. E. (2011). Obtenido de Cimentaciones Profundas: https://www.jorgealvahurtado.com/files/labgeo25_a.pdf
- Hurtado, J. E. (2011). Obtenido de Cimentaciones Profundas: https://www.jorgealvahurtado.com/files/labgeo25_a.pdf
- Hurtado, J. E. (s.f.). *Cimentaciones Profundas "Seminario Cimentaciones de Estructuras"*. Obtenido de https://www.jorgealvahurtado.com/files/labgeo25_a.pdf
- IDIGER. (s.f.). *Caracterización General del Escenario de Riesgo*. Obtenido de <https://www.idiger.gov.co/rconstrucciones>
- INGEARQ. (14 de Marzo de 2019). *La importancia de realizar un estudio de suelos previo a la construcción*. Obtenido de <https://ingearq.com.co/la-importancia-de-realizar-un-estudio-de-suelo-previo-a-la-construccion/>
- Ingeniería mecánica y automotriz. (10 de Diciembre de 2020). *Elemento finito FEA*. Obtenido de ¿Qué es un mallado en FEA y cuántos tipos existen?:

- <https://www.ingenieriaymecanicaautomotriz.com/category/ingenieria/elemento-finito-fea/>
- Jardine, R., Chow, F., Overy, R., & Standing, J. (2005). *ICP design methods for driven piles in sands and clays*. London: Thomas Telford Publishing.
- Javier, W. P. (6 de Septiembre de 2015). *Slideshare - La rigidez*. Obtenido de https://es.slideshare.net/jvrgrone/rigidez-tipos-de-estructuras?from_action=save
- Kikuchi, Y., Otani, J., Kimura, M., & Morikawa, Y. (2007). *Advances in Deep Foundations*. Yokosuka, Japon: Taylor & Francis.
- Kohan, P. H., Prato, C., & Pinto, F. (2012). *Determinación de Curvas Carga-Deformación Axial para Pilotes Excavados a partir de la Calibración de un Modelo Numérico con Resultados de Ensayos Dinámicos*. Cordoba: Mecanica computacional pags 2431-2441.
- Lehane, B. M., Schneider, J., & Xu, X. (2007). *The UWA-05 method for prediction of axial capacity of driven piles in sand*. The University of Western Australia.
- Medina, R., Salas, M., Richard, L., & Bertram, V. (2005). *Análisis de Estructuras Navales Mediante el Método de Elementos Finitos*. Chile: Universidad Austral de Chile.
- Mesa, M., & J, Á. (2011). *SciELO-Revista de la construcción*. Obtenido de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2011000300006
- Paniagua, W. I., & Ibarra, E. (2012). Evolución de la capacidad de carga de pilotes hincados. *Sociedad Mexicana de ingeniería geotécnica A.C.*
- Posada. (s.f.). *Cimentaciones profundas*. Obtenido de <https://posada.pe/cimentaciones-profundas/>
- Prado, A., Cervantes, O., & Ortiz, V. (2013). *CONCEPTOS BÁSICOS DEL MÉTODO POR ELEMENTO FINITO*. Procesos Manuf, 233-264.

- Rodio Kronsa. (s.f.). *Pruebas de carga en cimentaciones profundas*. Madrid, España.
- Sánchez Guambi, J. (2021). *Modelación numérica de Pilotes sometidos a carga axial pseudo-estática utilizando el programa Midas GTS NX*. Quito.
- Vintimilla Avila, C., & Avila Redrovan, E. (2016). *Análisis de modelos constitutivos para representar el comportamiento de los suelos del sector las orquideas de la Ciudad de Cuenca*. Cuenca: DEPARTAMENTO DE PROCESOS Y TÉCNICAS DE REALIZACIÓN ÁREA DE INVESTIGACIÓN ADMINISTRACIÓN Y TECNOLOGÍA PARA EL DISEÑO.
- Wallace, M. L. (2019). *Axial Load Transfer in large-scale physical Model Drilled Shaft Foundations*. Columbia.
- Wilde PDSVISION. (s.f.). *PLAXIS*. Obtenido de Wilde PDSVISION:
<https://wildeanalysis.co.uk/software/built-environment/plaxis/>
- Zienkiewicz, O. (2007). *El metodo de los elementos finitos*. Barcelona: Editorial Reverté.