

**MICROPILOTES ROSCADOS EN EL SUELO DEL DEPÓSITO LACUSTRE DE
LA CIUDAD DE TUNJA**

LUIS EDUARDO BARRERA MARTÍNEZ

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS DE AQUINO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2015**

**MICROPILOTES ROSCADOS EN EL SUELO DEL DEPÓSITO LACUSTRE DE
LA CIUDAD DE TUNJA**

LUIS EDUARDO BARRERA MARTÍNEZ

**Proyecto de grado presentado para optar al título de
INGENIERO CIVIL**

Director

JOSÉ RODRIGO MÉNDEZ ZULUAGA
Ingeniero civil

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS DE AQUINO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2015

Nota de aceptación:

Firma Jurado

Firma Jurado

Tunja, Febrero 2016

Dedico este trabajo a mis padres, a mis hermanos y a todas esas personas que me ofrecieron su mano y ayuda sin dudarlo, que sin ellas hoy no sería quien soy ni estaría en donde estoy.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a mis padres, a mis hermanos, a mi novia, a mis amigos y a la vida misma por permitirme lograr este objetivo y por estar conmigo en cada paso de mi vida.

Al ingeniero José Rodrigo Méndez por todo su tiempo y dedicación a este proyecto.

A la Universidad Santo Tomás de Aquino de Tunja y Facultad de Ingeniería Civil por brindarme los espacios e implementos necesarios.

Y a cada persona que me ayudo e hizo posible escribir las palabras de este documento, cada uno de ellos hace parte de las hojas adjuntas aquí.

CONTENIDO

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	17
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	17
1.2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	18
2. JUSTIFICACIÓN	19
3. OBJETIVOS.....	21
3.1. OBJETIVO GENERAL:	21
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	21
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	22
4.1. ESTADO DEL ARTE:.....	22
4.2. MARCO TEÓRICO:	34
4.2.1. LOS PILOTES: GENERALIDADES	34
4.2.2. REFERENCIAS HISTÓRICAS DE LOS PILOTES	36
4.2.3. TIPOS DE PILOTES:	39
4.2.4. LOS MICROPILOTES:	49
4.2.5. PRUEBAS DE CARGA SOBRE PILOTES:	51
5. METODOLOGÍA	54
5.1. TIPO DE MÉTODO:.....	54
5.2. INVESTIGACIÓN DEL SUBSUELO.....	54
5.2.1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	54
5.2.2. GEOLOGÍA	55
5.2.3. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA	58
5.2.4. ENSAYOS DE LABORATORIO	59
5.3. CONSTRUCCIÓN DE LOS MICROPILOTES.....	63
5.3.1. Construcción de un modelo patrón para los micropilotes:	63
5.3.2. Construcción de una formaleta para crear los moldes:.....	64
5.3.3. Construcción de los moldes de concreto	65
5.3.4. Construcción del refuerzo en espiral	67
5.3.5. Diseño de la mezcla de concreto.....	69

5.3.6.	Adecuación de los moldes.....	72
5.3.7.	Preparación de la mezcla de concreto:.....	74
5.3.8.	Control de calidad del concreto	74
5.3.9.	Fundición del concreto en los moldes	75
5.3.10.	Desenformado y curado de los micropilotes y cilindros de concreto:	76
5.3.11.	Falla de cilindros de concreto:	78
6.	CALCULO TEÓRICO DE LA CAPACIDAD DE CARGA POR FRICCIÓN ...	79
6.1.	Determinación del área de contacto:.....	80
7.	PRUEBAS DE CARGA-DEFORMACIÓN EN CAMPO	82
7.1.	INSTALACIÓN DEFINITIVA DE LOS MICROPILOTES EN EL TERRENO.....	82
7.1.1.	INSTALACIÓN DE LOS MICROPILOTES LISOS	86
7.1.2.	FALLA ESTRUCTURAL EN LOS PRIMEROS MICROPILOTES....	86
7.2.	EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS DE CARGA	88
8.	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	92
8.1.	ESTUDIOS DE SUELOS:	92
8.2.	RESULTADOS DE FALLA DE CILINDROS.....	93
8.3.	RESISTENCIA ULTIMA POR FRICCIÓN CALCULADA DE LOS MICROPILOTES	94
8.4.	ANÁLISIS DE LA FALLA ESTRUCTURAL DE LOS MICROPILOTES:.	95
8.5.	ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE CARGA.....	97
8.5.1.	MICROPILOTE ROSCADO N° 1:.....	98
8.5.2.	MICROPILOTE ROSCADO N° 2:.....	99
8.5.3.	MICROPILOTE ROSCADO N° 3:.....	101
8.5.4.	MICROPILOTE LISO N° 1:.....	102
8.5.5.	MICROPILOTE LISO N° 2:.....	104
8.5.6.	MICROPILOTE LISO N° 3:.....	105
8.5.7.	MICROPILOTE LISO N° 4:.....	107
8.6.	ANÁLISIS Y RELACIÓN ENTRE LAS PRUEBAS DE TODOS LOS MICROPILOTES:	108

9. CONCLUSIONES	113
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
11. APÉNDICES Y ANEXOS	119

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general de un pilote.	34
Figura 2. Estación petrolera apoyada sobre pilotes en medio del océano.....	35
Figura 3. Pintura de un asentamiento sobre la costa.	36
Figura 4. Muelle sostenido sobre pilotes de madera.	40
Figura 5. Pilotes prefabricados en concreto de sección transversal cuadrada. ..	41
Figura 6. Vertimiento de concreto en la excavación de un pilote.	42
Figura 7. Pilotes en acero con sección H y circulares	43
Figura 8. Hincado de un pilote de concreto.....	44
Figura 9. Instalación de un pilote de desplazamiento por medio de rotación.	45
Figura 10. Fuste de un pilote tipo "Atlas".	47
Figura 11. Proceso constructivo de un pilote Atlas	47
Figura 12. Recalce de una cimentación dentro de una edificación existente.	49
Figura 13. Esquema de recalce de una cimentación.....	50
Figura 14. Micro pilotes roscados de acero.....	51
Figura 15. Prueba de carga estática a un pilote.	52
Figura 16. Ejecución de una prueba de carga dinámica a un pilote.	53
Figura 17. Localización de la zona de estudio.	54
Figura 18. Geología de la zona de estudio.	57
Figura 19. Localización de los sondeos en la zona de estudio.....	58
Figura 20. Imágenes de la exploración geotécnica en el sitio de estudio.	59
Figura 21. Ensayo de humedad natural.	60
Figura 22. Ensayo de Limites de Atterberg.	61
Figura 23. Lavado de muestras con el tamiz N° 200.....	61
Figura 24. Ensayo de compresión inconfiada.	62
Figura 25. Ensayo de corte directo.	62
Figura 26. Modelo en acero con las dimensiones establecidas para los micropilotes.	63
Figura 27. Imágenes del proceso constructivo de la formaleta metálica.	64
Figura 28. Dimensiones de la formaleta metálica.	65
Figura 29. Ubicación de la armadura de refuerzo y del modelo en acero dentro de la formaleta metálica.....	65
Figura 30. Vaciado de concreto dentro de la formaleta metálica para los moldes.	66
Figura 31. Piezas de los moldes terminadas.....	66
Figura 32. Construcción de una espiral de acero corrugado..	67
Figura 33. Comparación entre los dos tipos de espirales fabricados, N°1 y N°2 respectivamente.	68

Figura 34. Armado de la espiral del refuerzo y acero longitudinal.	68
Figura 35. Ensayo de tamaño máximo de agregado y densidad en bruto seca respectivamente.	71
Figura 36. Adecuación de los molde de concreto.	73
Figura 37. Espirales de refuerzo y moldes preparados para fundir el concreto. .	73
Figura 38. Elaboración de la mezcla de concreto.	74
Figura 39. Prueba de asentamiento y elaboración de cilindros de concreto.....	74
Figura 40. Fundición del concreto dentro de los moldes.	75
Figura 41. Micropilotes lisos en los moldes de tubo PVC.....	76
Figura 42. Micropilote extraído del molde de concreto.	76
Figura 43. Extracción de un micropilote liso de su molde.....	77
Figura 44. Curado de cilindros y micropilotes de concreto.	77
Figura 45. Prueba de compresión a un cilindro de concreto.	78
Figura 46. Gráfica para la estimación de α según cohesión del suelo.....	80
Figura 47. Detalle de las áreas efectivas de un micropilote roscado.	81
Figura 48. Estado del lote en el momento de instalación de los pilotes.	82
Figura 49. Excavación y apertura de los prehuecos para la instalación de los micropilotes	83
Figura 50. Dispositivo utilizado para la instalación de los micropilotes.....	84
Figura 51. Instalación de los pilotes roscados.....	85
Figura 52. Instalación de los pilotes lisos.	86
Figura 53. Falla estructural en un micropilote roscado.	87
Figura 54. Doble troque cargada utilizada como contrapeso.	88
Figura 55. Sistema de carga establecido por el autor.	89
Figura 56. Celda de carga y montaje con regla y punto fijo.....	89
Figura 57. Ejecución de una prueba de carga.....	90
Figura 58. Cilindros de concreto fallados	93
Figura 59. Estado del terreno en la instalación de los primeros micropilotes fabricados.	95
Figura 60. Comparación visual entre los dos tipos de espirales utilizadas como refuerzo transversal.	96

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva carga vs desplazamiento Pilote roscado N°1	98
Gráfica 2. Curva desplazamiento vs tiempo micropilote roscado N°1	99
Gráfica 3. Curva carga vs desplazamiento micropilote roscado N°2	100
Gráfica 4. Curva desplazamiento vs tiempo micropilote roscado N°2	100
Gráfica 5. Curva carga vs desplazamiento micropilote roscado N°3	101
Gráfica 6. Curva desplazamiento vs tiempo micropilote roscado N°3	102
Gráfica 7. Curva carga vs deformación micropilote liso N°1	103
Gráfica 8. Curva desplazamiento vs tiempo Pilote liso N°1	103
Gráfica 9. Curva carga vs deformación micropilote liso N°2	104
Gráfica 10. Curva desplazamiento vs tiempo Pilote liso N°2	105
Gráfica 11. Curva carga vs deformación micropilote liso N°3	106
Gráfica 12. Curva desplazamiento vs tiempo Pilote liso N°3	106
Gráfica 13. Curva carga vs deformación micropilote liso N°4	107
Gráfica 14. Curva desplazamiento vs tiempo Pilote liso N°4	108
Gráfica 15. Curva carga vs deformación de todos los micropilotes	109
Gráfica 16. Curva desplazamiento vs tiempo todos los micropilotes.	110

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diferentes combinaciones de tipos de pilotes.	39
Tabla 2. Geología de la ciudad de Tunja y sitios aledaños.	56
Tabla 3. Ensayos de laboratorio efectuados a cada sondeo.	60
Tabla 4. Valores de trabajabilidad del concreto para diferentes tipos de estructuras.	69
Tabla 5. Resistencia promedio a la compresión, requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra.	70
Tabla 6. Resultados de ensayos de caracterización del agregado grueso.	71
Tabla 7. Resultados caracterización agregado fino.	72
Tabla 8. Peso de los materiales requeridos para fabricar 1 m ³ de concreto de 21 MPa.	72
Tabla 9. Áreas efectivas de un micropilote roscado	81
Tabla 10. Propiedades físicas y mecánicas de las muestras obtenidas.	93
Tabla 11. Resultados de resistencia de los cilindros de concreto.	94
Tabla 12. Parámetros utilizados en el cálculo de la capacidad ultima de carga por fricción.	94
Tabla 13. Resumen de los resultados obtenidos en cada prueba de carga.	108
Tabla 14. Cargas últimas por fricción teóricas y reales promedio de los micropilotes lisos y roscados	111

RESUMEN

La presente investigación estudia el comportamiento mecánico de micropilotes de concreto con geometría roscada ante pruebas de carga vertical, los cuales son aplicados en una muestra del depósito fluvio-lacustre de la ciudad de Tunja (Boyacá). Esto con el fin analizar la fricción entre el suelo y el fuste de los micropilotes roscados y micropilotes de superficie lisa. Para esto el autor estableció un tipo de geometría que permitiera generar una mayor fricción entre el fuste del micropilote y el suelo, y una instalación del elemento en el terreno similar al principio de los tornillos. Adicionalmente se realizó un estudio de suelos a la zona de estudio para determinar los parámetros geotécnicos necesarios en la investigación. Posteriormente se construyeron 8 micropilotes de concreto con geometría roscada y 4 micropilotes con superficie lisa. Estos fueron introducidos de manera manual en la zona de estudio y posteriormente se realizaron pruebas de carga-desplazamiento en campo a cada uno de ellos. De acuerdo a los resultados de las pruebas se obtuvieron curvas de esfuerzo-desplazamiento, que permitieron establecer la carga máxima soportada por cada micropilote y el desplazamiento correspondiente a esta. De esta manera se concluyó que los micropilotes con geometría roscada analizados en esta investigación, presentan una capacidad de carga por fricción mayor que los micropilotes lisos comparados.

ABSTRACT

This research studies the mechanical behavior of concrete micropiles with screw geometry against vertical load tests, which are applied in a sample of fluvial-lacustrine deposit of Tunja (Boyacá). This is to analyze and compare the friction between the floor and the shaft of the screw micropiles and the micropiles with smooth surface. For this, the author provides a type of geometry that would generate more friction between the shaft of the pile and the soil and an installation of the element in the soil similar to the screws concept. Additionally, a geotechnical investigation was carried out in the area in order to determine the soil parameters needed for this research. Subsequently, eight concrete micropiles with screw geometry and four 4 micropiles with smooth surface were constructed. These micropiles were manually inserted in the soil sample, then stress-displacement tests were performed in the field to each one of them. According to the test results it was possible to obtain stress-displacement curves, from which the maximum bearing capacity of each micropile and its displacement was determined. Thus it can be concluded that the micropiles with screw geometry, which were analyzed in this research, have a larger friction bearing capacity compared with micropiles with smooth surface.

INTRODUCCIÓN

Muchos lugares donde las personas han deseado construir nuevas edificaciones son terrenos con materiales pobres, sueltos y con baja resistencia portante. Por esta razón es necesario utilizar elementos que permitan apoyar los recintos sin que estos se hundan o desplomen. Esto dio inicio al uso de las cimentaciones, que en sus comienzos fueron elementos de piedra o madera acomodados sobre un terreno. Esta práctica data de muchos siglos atrás y ha sido evidenciada en las ruinas de varias civilizaciones como la romana y la egipcia. Hoy en día su uso es común en cada construcción y se ha convertido en una ciencia en desarrollo y de estudio.

Los pilotes y micropilotes son cimentaciones que transmiten las cargas de una estructura a estratos que se encuentran a mayor profundidad. Son uno de los sistemas de cimentación más utilizados en todo el mundo y abarcan numerosos procesos constructivos, materiales y formas. Sin embargo aún existen muchas incógnitas sobre su comportamiento, haciendo de este un tema de investigación para mejorarlos en su eficiencia y economía.

Existe un tipo de cimentación profunda conocido como *pilotes roscados* o *screw piles*, que se están desarrollando en países como Bélgica, China, Corea y Japón. Este tipo de pilotes se caracteriza por tener una configuración geométrica con estrías o roscas en el fuste, la cual aumenta su resistencia por fricción. Aun así es un tema de investigación muy joven y son pocos los resultados que han permitido aplicarlos satisfactoriamente en la práctica constructiva. Por esta razón las investigaciones continúan en desarrollo.

Sin embargo a nivel regional y nacional ha sido mínimo el desarrollo investigativo sobre este tipo de pilotes; desconociendo así su comportamiento en zonas importantes de nuestro país. Debido a esto el sector de la construcción se ha limitado a utilizar los sistemas tradicionales que están disponibles en el mercado, y sin poder implementar aquellos que están en auge en Europa y Asia.

Teniendo en cuenta lo anterior, este proyecto analiza el comportamiento de la fricción en micropilotes de concreto con geometría roscada ante la aplicación de cargas verticales. Estos son aplicados en una muestra del depósito lacustre de la ciudad de Tunja (Boyacá); en donde los suelos más superficiales presentan baja resistencia a compresión y baja capacidad portante. De esta manera se evalúa la

viabilidad técnica de estos elementos comparándola con micropilotes de geometría lisa ensayados bajo las mismas condiciones.

El desarrollo metodológico llevado a cabo en esta investigación, establece procedimientos de construcción de prototipos, pruebas de campo y laboratorio a muestras de suelo, ejecución de pruebas de carga-desplazamiento a los prototipos, análisis de resultados y finalmente la generación de conclusiones y recomendaciones.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En el depósito lacustre de la ciudad de Tunja se encuentran materiales conformados por arcillas, limos y arenas con alto contenido de material orgánico. Por lo que presenta alta compresibilidad y parámetros de resistencia al cortante desfavorables ante la aplicación de cargas verticales. Estas condiciones geotécnicas son limitantes desde un punto de vista técnico y económico para la construcción de proyectos de infraestructura en esta zona de la ciudad, ya que las cimentaciones superficiales no son suficientes para cierto tipo de estructuras. Así mismo se pueden presentar daños en las edificaciones por grandes asentamientos, los cuales generan fisuras y fallas estructurales.

Para mitigar este tipo de problemas, existen diferentes sistemas constructivos que se adaptan a las condiciones del terreno, como son el pilotaje a gran profundidad o los caissons. Estas cimentaciones profundas involucran un gran proceso constructivo, utilizando maquinaria especializada y de gran tamaño que aumenta los costos operativos y de movilización. Además en algunos casos la zona donde se desarrolla la construcción, no tiene el espacio suficiente para la movilización o ingreso de la maquinaria necesaria. Por estas circunstancias las inversiones económicas aumentan a la hora de realizar un proyecto en terrenos con las condiciones descritas anteriormente.

Sin embargo existe un tipo cimentación profunda que puede superar los problemas de espacio en la zona de trabajo y que funciona de manera similar a los pilotes. Este es el caso de los micropilotes que se construyen en concreto o acero, y que utilizan maquinaria de un menor tamaño para su instalación y fabricación. Un tipo de micropilotes que se viene implementando en diferentes lugares del mundo, son elementos prefabricados en acero con aspas a lo largo del fuste que permiten una mayor capacidad de carga por fricción. El problema con este tipo de elementos radica en que los diámetros y longitudes de fabricación no son muy grandes, debido al costo que tiene en el mercado el acero estructural. Por tal razón este tipo de cimentación no posee una gran capacidad portante y se limita su uso a estructuras pequeñas o provisionales.

Finalmente, fundir cimentaciones profundas in situ implica un mayor desperdicio de concreto, control de expansiones del material o garantizar en algunos casos

la estabilidad de la excavación por medio de polímeros. Adicionalmente se requiere un mayor tiempo de espera antes de aplicar las cargas sobre la cimentación, debido al tiempo necesario para que el concreto adquiera la resistencia de diseño.

De acuerdo a lo anterior y en busca a una solución técnica y económica, no existen en el medio regional estudios que avalen a los micropilotes con geometría roscada propuestos, como una solución a los problemas expuestos previamente de la zona.

1.2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

➤ ¿Los micropilotes roscados planteados tienen mayor resistencia a la fricción en el suelo lacustre de la ciudad de Tunja en comparación con micropilotes lisos?

2. JUSTIFICACIÓN

La ciudad de Tunja al ser la capital del departamento de Boyacá se ha convertido en un atractivo de inversión y desarrollo para la región. El aumento de instituciones educativas como universidades y colegios, así como centros especializados de salud y hospitales, han cautivado a muchos habitantes de otros municipios para asentarse en alguna de las zonas que ofrece la ciudad. Esta situación ha estimulado la construcción de infraestructura, principalmente de edificios de vivienda de mediana y gran altura.

Una de las principales zonas de desarrollo en infraestructura residencial y comercial establecida por el Plan de Ordenamiento (POT) de la ciudad, es en torno a la avenida Universitaria y a la rivera del río Jordán. En este sector se encuentran unas de las principales edificaciones de la ciudad como el centro comercial Unicentro, La Universidad Santo Tomás, la clínica SaludCoop, una sede de los bomberos, el centro de negocios Green Hills, la Ciudad Hayuelos Santiago de Tunja, entre otras. Asegurando de esta manera que el sector es uno de los más codiciados para vivir e invertir.

Sin embargo este sector presenta características geotécnicas desfavorables para la construcción de diversas edificaciones, debido a la baja resistencia portante y la alta compresibilidad de los suelos más superficiales del depósito donde se encuentran. Para solventar esta situación es necesario utilizar sistemas de cimentación más especializados y costosos que los usados convencionalmente, como lo es el pilotaje a gran profundidad. Este sistema se ha venido implementando durante los últimos años en la mayoría de las edificaciones construidas en el sector.

De esta manera, con la ejecución de esta investigación se contribuye a la búsqueda de alternativas que permitan un desarrollo económico y seguro en la construcción de esta zona de la ciudad. Para esto se plantea una cimentación alternativa utilizando micropilotes roscados. Los cuales se espera presenten condiciones favorables de capacidad de carga vertical e inversiones económicas convenientes. De esta forma se analiza el prototipo de un producto que beneficie directamente el sector de la construcción e indirectamente a los consumidores de la región.

Una de las principales ventajas de esta investigación, radica en que sus resultados pueden ser aplicados en otros lugares con condiciones geotécnicas similares. Permitiendo de esta manera extender los posibles beneficios a otras comunidades dentro y fuera del país.

Finalmente es un aporte de conocimiento a la ingeniería geotécnica, ya que los micropilotes propuestos contienen una metodología y un procedimiento constructivo innovador. Por otro lado no se han desarrollado investigaciones en el país que abarquen la temática planteada, haciendo de esta un punto de partida para el autor o futuros investigadores que deseen profundizar en el tema y obtener mejores resultados.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL:

Analizar mediante pruebas de carga-desplazamiento en campo, el comportamiento de la fricción de micropilotes prefabricados de concreto y con geometría roscada ante la aplicación de cargas verticales; aplicados a una muestra del depósito lacustre de la ciudad de Tunja.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Hacer una revisión del estado del arte sobre el tema y de la literatura relacionada con el contexto de la investigación.
- Efectuar por medio de ensayos de laboratorio una caracterización de los parámetros de resistencia del suelo utilizado y de los micropilotes.
- Construir 7 micropilotes de concreto con geometría roscada y 4 micropilotes lisos de acuerdo a las dimensiones establecidas.
- Realizar pruebas de carga-desplazamiento en campo a los micropilotes fabricados.

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1. ESTADO DEL ARTE:

➤ **CHOI, Yongkyu; KIM, Dong-Chol, KIM, Sung-Soo, NAM, Moon S y KIM Tae-Hyung. “Implementation of noise-free and vibration-free PCH screw piles on the basis of full-scale tests”¹.** La investigación estudia un prototipo de construcción e instalación de pilotes roscados conocidos como “PHC Screw Piles” (Pretensioned Spun High-strength Concrete). Estos presentan niveles de ruido y vibración mínimos con el fin de mitigar los grandes niveles de contaminación ambiental, generada por las vibraciones y ruidos de los sistemas de construcción de pilotes convencionales en Europa y Asia. La zona de estudio en donde se desarrolló la investigación fue en un sector residencial de la ciudad de Busen, Corea.

La metodología consistió en la construcción de secciones de pilotes huecos de 50 centímetros de diámetro y 10 metros de longitud en concreto pretensado, con una hila de roscas helicoidales del mismo material en toda la superficie del elemento. Tres secciones fueron soldadas con juntas metálicas para generar pilotes de 30 metros de longitud y así alcanzar la profundidad establecida del terreno. En total se construyeron e introdujeron 8 pilotes distribuidos en la zona de estudio. En la parte inferior del pilote se adhirió una broca que perforó el terreno y permitió la introducción por rotación de los pilotes en el suelo. La cabeza del pilote se sujetó a un motor rotatorio, ubicado en la parte superior de una grúa. Paralelamente se midieron los niveles de decibeles del ruido y vibración que se generó con la introducción de cada uno de los pilotes en el terreno.

La investigación incluyó un análisis numérico en 2D, que comparó el comportamiento de los pilotes PHC roscados y PHC convencionales con el suelo. De acuerdo a los resultados obtenidos, el análisis numérico indicó que los pilotes roscados presentan una mayor capacidad de carga y un menor asentamiento que los pilotes PHC convencionales. Esto debido a la fricción que desarrollan las roscas del elemento con el suelo. También se determinó que los

¹ CHOI, Yongkyu.; KIM, Dong-Chol; KIM, Sung-Soo; NAM, Moon S. y KIM Tae-Hyung. Implementation of noise-free and vibration-free PCH screw piles on the basis of full-scale tests. En: Journal of Construction Engineering and Management. 2013. Vol. 139, no. 8, p. 960-967.

esfuerzos de torsión generados en el cuerpo no confinado del pilote, fueron muy altos y destruyeron completamente dicha parte del elemento. Por esta razón 5 de los 8 pilotes construidos no alcanzaron la profundidad deseada.

Para solventar esta situación, se modificó el procedimiento de perforación e instalación de los pilotes y así disminuir los esfuerzos de torsión sobre ellos. De esta manera se alcanzó con 3 pilotes la profundidad establecida. Finalmente los niveles de decibeles generados por el ruido y vibración en la instalación de los pilotes del estudio fueron menores que los de los sistemas PHC convencionales.

➤ **MANGUSHEV, R.; KONYUSHKOV, V. y D'YAKONOV, I. “Analysis of Practical Application of Screw-in Cast Piles”².** Este artículo analizó las ventajas y desventajas de los pilotes de desplazamiento fundidos in situ tipo “Fundex” y “Atlas”. Estos son sistemas que se han afianzado en el mercado europeo durante los últimos 15 años. La investigación tuvo lugar en la ciudad de San Petersburgo, Rusia; y estudió el desempeño que los sistemas mencionados han tenido en diversas edificaciones de la ciudad. De esta forma se evidenciaron fallas, afectaciones en su ejecución y la influencia en construcciones circundantes.

Los pilotes “Fundex” y “Atlas” se caracterizan por excavar en las capas del terreno por medio de brocas especiales adheridas a una tubería en acero, que rotan gracias a un motor en la superficie. La tubería sostiene las paredes laterales de la perforación antes de bombear el concreto a través en ella. Al mismo tiempo que es perforado el terreno por la broca, el material suelto es compactado hacia las paredes laterales de la excavación, evitando la extracción del material hacia la superficie. Cuando la broca de perforación ha alcanzado la profundidad de diseño, esta se asciende con rotación contraria a la que descendió mientras es bombeado el concreto a través la tubería de acero.

Los pilotes “Atlas” se diferencian de los “Fundex” porque en el proceso de excavación la broca utilizada genera una hila de roscas helicoidales en las paredes del agujero, haciendo de esta manera una configuración geométrica

² MANGUSHEV, R.; KONYUSHKOV, V. y D'YAKONOV, I. Analysis of Practical Application of Screw-in Cast Piles. En: Soil Mechanics & Foundation Engineering. Noviembre, 2014. vol. 51, no. 5, p. 227-233.

única. Este sistema mejora la resistencia a la fricción entre el pilote y el suelo, y así mismo la capacidad de carga del elemento.

La metodología estudió cada una de las ventajas y desventajas de los sistemas mencionados, referenciando ejemplos de construcciones realizadas con estos sistemas en la ciudad de San Petersburgo. Como resultado, se estableció que las principales ventajas de los sistemas “Atlas” y “Fundex” son: No hay efectos dinámicos sobre la masa de suelo circundante, no es necesaria la extracción ni transporte de suelo, excelentes rendimientos de construcción por día. Así mismo se establecieron las siguientes desventajas: dificultad de la broca para atravesar suelos de media-alta deformabilidad; dificultad introduciendo la canasta de acero de refuerzo en el concreto; desprendimientos en las paredes de la excavación cuando la presión del concreto es insuficiente para sostenerlas; afectación en las propiedades de resistencia en la masa de suelo circundante al pilote; la cual se recupera dentro de 25 días debido a su relajación; afectación a cimentaciones de construcciones vecinas.

➤ **PRASAD, Y. y RAO, S. “Lateral Capacity of Helical Piles in Clays”³.** Este artículo expuso los análisis y resultados de la capacidad de carga lateral de pilotes helicoidales de acero. Estos fueron hechos a escala en suelos arcillosos de la costa este de la India. Además se propuso un modelo teórico según los resultados observados.

La metodología utilizada en la investigación consistió en realizar pruebas de carga lateral a 3 tipos diferentes de pilotes helicoidales. Se registraron las deformaciones y cargas aplicadas por medio de un sistema electrónico y celdas de carga respectivamente. Los pilotes se diferenciaron de acuerdo al número de placas helicoidales adheridas al eje de estos, donde el espécimen P0 no tenía ninguna placa adherida y solamente era un eje recto de 13.8 mm de diámetro. El espécimen P2 tenía el mismo eje y dos placas helicoidales de 33.0 mm de diámetro adheridas en la parte inferior de este y separadas a 150.0 mm. El espécimen P4 tenía las mismas configuraciones del P2, pero con dos placas helicoidales adicionales, las cuales estaban separadas cada 49.70 mm.

³ PRASAD, Y. y RAO, S. Lateral Capacity of Helical Piles in Clays. En: Journal of Geotechnical Engineering. Noviembre, 1996. vol. 122, no.11, p. 938–941.

El suelo arcilloso fue depositado en capas de 50 mm de espesor en un recipiente cilíndrico de 500 mm de diámetro y 600 mm de altura, y se determinó el límite líquido y límite plástico del suelo. Por cada prueba de carga se introdujo un tipo de pilote por rotación vertical dentro de las capas, hasta alcanzar la profundidad requerida en cada ensayo. En seguida se aplicó la carga lateral a la cabeza del pilote por medio de poleas y pesas en acero, mientras se registraban las cargas en Newton (N) y las deformaciones laterales en mm. Según los resultados se concluyó que los pilotes con placas helicoidales adheridas a su eje presentaron una mayor capacidad de carga lateral en un rango de 1.2-1.5 veces en comparación al pilote sin placas. Adicionalmente la capacidad de carga lateral aumenta con el número de placas helicoidales en cada pilote y con mayor profundidad de empotramiento en el suelo.

➤ **LI, Xin y LIANG, Li. “Experimental and numerical study on torsional behavior of precast concrete screw pile body”⁴**. Esta investigación analizó por medio de un ensayo experimental y un análisis numérico, el comportamiento de pilotes prefabricados con geometría roscada en concreto (pretensado y reforzado) ante esfuerzos de torsión sobre su eje. Con el fin de determinar parámetros aplicables a su diseño y construcción. En las pruebas experimentales se utilizaron 4 pilotes de concreto (2 en concreto reforzado y 2 en concreto pretensado) con dimensiones de: 1600 mm de longitud, 400 mm de diámetro externo y 210 mm de diámetro interno. Estos fueron reforzados con acero longitudinal de 9 mm de diámetro y una espiral de 5 mm de diámetro separada entre 50 y 100mm.

Se dispuso una estructura metálica donde se apoyaron horizontalmente los extremos de un pilote y se restringió su movimiento. Luego se aplicó una fuerza de torsión a un extremo del elemento por medio de un gato hidráulico hasta alcanzar el punto de falla. Sobre la superficie de los pilotes se adhirieron sensores que registraban la tensión superficial del concreto. Consecutivamente se realizó un análisis numérico por medio del método de elementos finitos y utilizando los mismos parámetros de los ensayos experimentales. De esta forma se compararon los resultados obtenidos en los dos tipos de ensayos.

⁴ LI, Xin y LIANG, Li. Experimental and numerical study on torsional behavior of precast concrete screw pile body. En: Applied Mechanics and Civil Engineering II. Septiembre, 2012. vol. 188, p. 137-143.

Como resultado, en las pruebas experimentales se presentaron fisuras en forma espiral distribuidas a lo largo de todo el eje de los 4 pilotes. Por medio de celdas de carga se registraron los momentos torsores que generaron las fisuras y los momentos torsores últimos de falla. Así mismo se registró el ángulo de giro por unidad de longitud correspondiente a cada uno de los momentos. Se obtuvieron momentos torsores máximos de falla de 72.16 KN-m y 65.64 KN-m en los pilotes de concreto pretensado y de 51.50 KN-m 47.51 KN-m en los pilotes de concreto reforzado. Paralelamente el análisis numérico arrojó los momentos con los cuales el elemento presentaría fisuras y su falla última.

Según los resultados obtenidos en las pruebas experimentales, se estableció que los momentos de fisura y de falla última son muy similares a los obtenidos en la modelación numérica con un error máximo del 8.10 %. Finalmente se concluyó que el método de elementos finitos es apropiado para el análisis y diseño de pilotes prefabricados con geometría roscada. Además, el concreto pretensado es adecuado para soportar grandes fuerzas de torsión y por consiguiente es la mejor alternativa para la construcción de este tipo de cimentación.

➤ **“LI, Xiu Hua; CONG, Wei Min; YUE, Chen Xi y CHEN, Ya Dong. “Analysis the bearing force characteristic of the new cast-in-place concrete pile with half-screwed”⁵.** Esta investigación analizó el comportamiento de un nuevo tipo de cimentación profunda de pilotes pre-excavados y fundidos in situ conocidos como *HALF-SCREWED PILES*. Estos tienen una geometría roscada en diferentes secciones del pilote, la cual es generada por medio de una broca que desplaza el suelo suelto hacia las paredes circundantes de la excavación.

Debido a las estrías presentes en el pilote, se aumentó la fricción entre el fuste y el terreno circundante. Esta cualidad mejoró la capacidad de carga del pilote, generó una mayor estabilidad y mejor resistencia al arranque que un pilote liso. También se analizó la transferencia de la carga vertical desde los pilotes hacia el terreno, utilizando los resultados obtenidos en pruebas de carga estática aplicadas previamente en ellos.

⁵ LI, Xiu Hua; CONG, Wei Min; YUE, Chen Xi y CHEN, Ya Dong. Analysis the bearing force characteristic of the new cast-in-place concrete pile with half-screwed. En: Progress in Industrial and Civil Engineering II. Julio, 2013. vol. 405-408, p. 841-844.

➤ **LI, Xiu Hua; GAO, Yan; YUE, Chen Xi y WANG, Chen Wu. “Construction Technology of the New Cast-in-Place Concrete Pile with Half-Screwed”⁶.** Esta investigación analizó el proceso constructivo y el desarrollo técnico utilizado en la construcción de pilotes pre-escavados y fundidos en situ, los cuales presentan una geometría roscada en las secciones más profundas del elemento (HALF-SCREWED PILE). Adicionalmente estudió las ventajas en la aplicación de este nuevo tipo de pilotes a situaciones reales.

➤ **LIU, Jian Xiong; GAO, Yan y LI, Xiu Hua. “Prediction of ultimate bearing capacity of half-screwed pile by integrated exponential function model”⁷.** Esta investigación predijo la capacidad última de carga de pilotes individuales pre-escavados y fundidos en situ (HALF-SCREWED PILE), los cuales poseen una geometría roscada en las secciones más profundas del elemento. La predicción de la capacidad de carga se llevó a cabo utilizando el análisis numérico en un modelo matemático computacional. Este ajustó las curvas de carga-deformación obtenidas de pruebas estáticas de carga a pilotes “HALF-SCREWED” contruidos anteriormente. Para esto se utilizaron los puntos máximos de las curvas de carga-deformación. Debido a ser un sistema constructivo nuevo, no existen bases teóricas que permitieron describir el comportamiento de este tipo de pilotes.

➤ **LI, Cheng-Wei; CHEN, Jin-Jian; WU, Qiong; XIA, Xiao-He y WANG, Jian-Hua. “Bearing mechanism and calculation method of screw pile”⁸.** En el proyecto se estudió el comportamiento ante cargas verticales de pilotes roscados fundidos in situ; utilizando los resultados obtenidos en pruebas de carga deformación, y de un análisis numérico. Los parámetros de análisis aplicados en los ensayos fueron las propiedades de interacción entre el cuerpo del pilote y el terreno, la fuerza cortante del suelo y las dimensiones del elemento. Como resultado, se determinó que la capacidad de carga en los pilotes roscados dependió directamente de la fuerza contante del terreno circundante al elemento,

⁶ LI, Xiu Hua; GAO, Yan; YUE, Chen Xi y WANG, Chen Wu. Construction Technology of the New Cast-in-Place Concrete Pile with Half-Screwed. En: Advances in Civil and Industrial Engineering. Mayo, 2013. vol. 353-354, p. 2847-2850.

⁷ LIU, Jian Xiong; GAO, Yan y LI, Xiu Hua. Prediction of ultimate bearing capacity of half-screwed pile by integrated exponential function model. En: Advances in Civil and Industrial Engineering. Mayo, 2013. vol. 353-357, p. 881-885.

⁸ LI, Cheng-Wei; CHEN, Jin-Jian; WU, Qiong; XIA, Xiao-He y WANG, Jian-Hua. Bearing mechanism and calculation method of screw pile. En: Shanghai Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Shanghai Jiaotong University. Junio, 2010. Vol. 44, no. 6, p. 726-730.

el paso de rosca en el fuste y el ancho de la rosca. Finalmente se desarrolló un método de cálculo para predecir la capacidad de carga en los pilotes establecidos.

➤ **WANG, Bin; QIAN, Jian-Gu; CHEN, Hong-Wei; HUANG, Mao-Song y Hu, Yu-Yin. “Numerical analysis of grouting-screw pile uplift bearing capacity”⁹.** Esta investigación estudió por medio de un análisis numérico de elementos finitos en tres dimensiones, la capacidad de resistencia al arranque de pilotes roscados fundidos in situ. Inicialmente se obtuvieron mediante ensayos de corte directo los parámetros del suelo en interacción con el pilote, y utilizarlos posteriormente en el análisis numérico.

Como resultado se generaron curvas de carga-deformación y la distribución de la fuerza axial a lo largo del cuerpo de los pilotes lisos y roscados, variando el paso de rosca en los últimos. De acuerdo a los resultados del análisis, se observa un aumento en la fricción superficial de los pilotes roscados, generando un aumento en la capacidad de soporte al levantamiento entre 3 y 5 veces mayor que pilotes con superficie circular lisa.

➤ **WU, Qi Hong; WU, Qing y WAN, Shi Ming. “Contrast Analysis about the Result of Static Load Test and High Strain Testing for the Bearing Capacity of Screw Pile Foundation”¹⁰.** Esta investigación realizó una comparación y análisis entre los resultados obtenidos de pruebas de carga estática y dinámica ejecutadas a pilotes de concreto con geometría roscada. Estos elementos presentaron un aumento en su capacidad de carga debido la fricción generada entre las roscas del elemento y el suelo. De acuerdo a las curvas de carga-deformación obtenidas de cada prueba, se estableció que los pilotes roscados ensayados con pruebas de carga dinámica tienen un aumento en su capacidad de soporte entre un 13% y 21% en comparación con los pilotes roscados ensayados con pruebas de carga estática. Se consideró esta característica como un aspecto fundamental para el análisis y diseño de este tipo de pilotes.

⁹ WANG, Bin; QIAN, Jian-Gu; CHEN, Hong-Wei; HUANG, Mao-Song y Hu, Yu-Yin. Numerical analysis of grouting-screw pile uplift bearing capacity. En: Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics. Octubre, 2014. vol. 35, p. 572-578.

¹⁰ WU, Qi Hong; WU, Qing y WAN, Shi Ming. Contrast Analysis about the Result of Static Load Test and High Strain Testing for the Bearing Capacity of Screw Pile Foundation. En: Advances in Civil Structures IV. Mayo, 2014. vol. 578-579, p. 663-666.

➤ **DONG, Tian-Wen; LIANG, Li; HUANG, Lian; YANG, Chong y WANG, Ming. “Experimental research on bearing characters of screw pile group”¹¹.**

Esta investigación analizó factores que influyen en la capacidad de carga de un grupo de pilotes roscados de concreto, utilizando los resultados obtenidos en pruebas de carga estática aplicadas sobre estos. Además, es discutida la influencia que tienen los parámetros geométricos del elemento en la capacidad de carga final y en la resistencia a la fricción.

➤ **DONG, Tian-Wen y LIANG, Li. “Solution of load-settlement function of single screw pile under axial pressure”¹².**

La investigación estableció una función matemática de carga-asentamiento para un pilote roscado de concreto bajo cargas axiales. Además fue analizada la transferencia de la fuerza generada en el pilote hacia el terreno, utilizando 6 curvas de carga-deformación (P-s curve), obtenidas de ensayos estáticos aplicados a diferentes tipos de pilotes roscados. Finalmente por medio del método s-LogP, fue posible estimar la capacidad última de carga de los elementos. De esta manera, diferentes parámetros de diseño fueron propuestos para predecir la capacidad de carga última de un pilote de este tipo.

➤ **LI, Zhiyi; LIU, Zhong; ZHAO, Yanfei y ZHANG, Huidong. “Field test study of new-type soil displacement screw pile”¹³.**

En esta investigación se estudiaron los efectos de la compactación del suelo, las características de carga y la resistencia a la fricción de pilotes roscados de desplazamiento (SDS). Estos fueron comparados con pilotes lisos a base de cemento de cenizas volcánicas (CFG), los cuales se construyen con un sistema de extracción de suelo usado comúnmente en Asia. Para esto se realizaron pruebas de cargas estáticas a los diferentes tipos de pilotes en un sitio de la ciudad de Beijing.

¹¹ DONG, Tian-Wen; LIANG, Li; HUANG, Lian; YANG, Chong y WANG, Ming. Experimental research on bearing characters of screw pile group. En: Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics. Abril, 2008. vol. 29, no. 4, p. 893-896.

¹² DONG, Tian-Wen y LIANG, Li. Solution of load-settlement function of single screw pile under axial pressure. En: Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering. Octubre, 2007. vol. 29, no. 10, p. 1483-1487.

¹³ LI, Zhiyi; LIU, Zhong; ZHAO, Yanfei y ZHANG, Huidong. Field test study of new-type soil displacement screw pile. En: Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. Febrero, 2011. vol. 30, no. 2, p. 411-417.

Los resultados mostraron que la superficie vertical del agujero se compactó desde el comienzo de la perforación por medio de la broca utilizada, haciendo estable las paredes a medida que aumentaba la profundidad. Finalmente, los resultados de las pruebas mostraron un aumento de la capacidad de carga de los pilotes SDS en un 30% y 50% en comparación con los pilotes CFG, bajo el mismo nivel de asentamiento.

➤ **QUIAN, Jiangu; CHEN, Hongwei; JIA, Peng; HUANG, Maosong y Hu, Yuyin. “Experimental study of mechanical behaviours of grouting-screw pile interface”¹⁴.** La investigación se realizó con el fin de entender el comportamiento ante cargas axiales de levantamiento, en un nuevo tipo de pilotes con geometría roscada y fundidos in situ. Para esto se ejecutó un ensayo experimental por medio de un modelo a gran escala. Este midió la fuerza cortante en la zona de interacción entre el pilote y el suelo y la forma de falla correspondiente. Los resultados demostraron que en los pilotes con geometría lisa se presentaron fallas planas en la zona de interacción, mientras que en los pilotes roscados se presentaron fallas con forma de curvatura de arco en la zona de interacción con el suelo. Además, se concluyó que el efecto de la perforación genera un incremento en la cohesión y resistencia cortante del suelo.

➤ **LUTENEGGER, Alan J; KEMPER, James H. “Preservation of historic structures using Screw-Pile foundations”¹⁵.** En el artículo se describió como fueron preservadas y rehabilitadas cinco edificaciones históricas e importantes de la ciudad de Londres, las cuales presentaban asentamientos perjudiciales para su estructura. Para esto se apuntalaron sus fundaciones por medio de pilotes de acero con hélices, que fueron introducidos por rotación al terreno. Los casos de estudio demostraron una gran economía y eficiencia al usar este tipo de cimentación. Además no se perjudicó la integridad general de las estructuras intervenidas ni en las edificaciones vecinas.

¹⁴ QUIAN, Jiangu; CHEN, Hongwei; JIA, Peng; HUANG, Maosong y Hu, Yuyin. Experimental study of mechanical behaviours of grouting-screw pile interface. En: Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. Septiembre, 2013. vol. 32, no. 9, p. 1744-1749.

¹⁵ LUTENEGGER, Alan J; KEMPER, James H. Preservation of historic structures using Screw-Pile foundations. En: Structural Analysis of Historic Construction: Preserving Safety and Significance - Proceedings of the 6th International Conference on Structural Analysis of Historic Construction. Julio, 2008. vol. 2, p. 1079-1086.

➤ **LIU, Zhong; Lu, Jing Chun; ZHANG, Yi; LI, Zhi-Yi y JIA, Yudong. “Model test study of load deformation behavior of soil displacement screw pile in sand”¹⁶.** En esta investigación se analizó un nuevo tipo de pilote roscado de desplazamiento y fundido in situ conocido como “*Soil Displacement Screw pile*” (SDS). Este se construyó utilizando una broca de perforación desarrollada por los autores y se probaron con un sistema de carga estática para pilotes. La investigación se llevó a cabo en un suelo de arena homogénea, con el fin de estudiar el mecanismo de transferencia y el comportamiento de carga-deformación de este tipo de pilotes de desplazamiento en comparación con pilotes CFA.

Se ejecutaron ensayos de carga a los dos tipos de pilotes (SDS y CFA) bajo las mismas variables de longitud, diámetro y tipo de suelo. Se encontró un aumento en la capacidad de carga entre 25% hasta 70% en los pilotes SDS en comparación con los CFA. También se observó una distribución asincrónica de la fricción superficial del pilote SDS con el suelo desplazado, en un rango del 20% con respecto al diámetro del pilote. El desplazamiento y compactación del suelo generó un aumento en la fricción superficial, haciendo mayor la resistencia en el fuste que en la base del pilote. Se concluyó que en los pilotes SDS la longitud del elemento tiene un papel más importante en la capacidad de carga que en los pilotes CFA.

Finalmente se analizaron los resultados de acuerdo a la teoría de presión de tierras de Terzaghi y Peck. Se determinó que el aumento en el comportamiento carga-deformación, se debe a la influencia de los métodos constructivos sobre las propiedades y parámetros mecánicos del suelo, los cuales fueron modificados y alterados.

➤ **YAO, Jian-Ming; MENG, Zhen; CHEN, Jin-Jian y WANG, Jian-Hua. “Application of drilled screw piles in Shanghai soft soils”¹⁷.** En esta investigación se analizó que tan convenientes son los pilotes perforados-roscados en suelos blandos de la ciudad de Shanghai (China), en comparación con pilotes de excavación convencional usados en esa zona del país. Para esto,

¹⁶ LIU, Zhong; Lu, Jing Chun; ZHANG, Yi; LI, Zhi-Yi y JIA, Yudong. Model test study of load deformation behavior of soil displacement screw pile in sand. En: Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. Marzo, 2011. vol. 30, no. 3, p. 616-624.

¹⁷ YAO, Jian-Ming; MENG, Zhen; CHEN, Jin-Jian y WANG, Jian-Hua. Application of drilled screw piles in Shanghai soft soils. En: Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering. Octubre, 2013. vol. 35, no. SUPPL. 2, p. 1058-1061.

los autores utilizaron métodos de cálculo existentes para predecir la capacidad de carga en los dos tipos de pilotes. De acuerdo a los resultados, se estableció que los pilotes perforados-roscados tienen una capacidad de carga mayor 1.47 veces que los pilotes comparados. Posteriormente, se realizaron pruebas de carga dinámicas y estáticas a los pilotes de perforación roscada. Los resultados de las pruebas establecieron altos valores en la capacidad de carga y muy similares a los predichos por los métodos de cálculo. De esta manera se validó el método utilizado y se estableció que este tipo de pilotes son viables para los suelos blandos de Shanghai

➤ **MENG, Zhen; CHEN, Jin-Jian y WANG, Jian-Hua y YIN, Zhen-Yu. “Study of model test on bearing capacity of screw piles in sand”¹⁸.** La investigación comparó por medio de ensayos de carga estática en arena, la capacidad de carga de un tipo de pilote roscado y un tipo de pilote liso convencional. Además fue analizada la influencia del paso de rosca de los pilotes. Posteriormente se realizaron ensayos para establecer las propiedades físico-mecánicas de la arena. Los resultados de las pruebas de carga establecieron que bajo las mismas condiciones, los pilotes roscados presentan una capacidad de carga de 1 a 4 veces mayor que los pilotes lisos, así como la fricción última es de 3 a 4 veces mayor. Se observó finalmente que una disminución en el paso de rosca de los pilotes genera una reducción en la capacidad de carga, fricción superficial y el control del asentamiento gradual.

➤ **LIU, Zhong; YANG, Song; Lu, Jing Chun y LI, Zhi-Yi. “Full scale field load tests on bearing capacity of SDS pile and CFA pile”¹⁹.** En la investigación se llevó a cabo un análisis de los pilotes roscados de desplazamiento (SDS) en comparación con los pilotes de extracción de suelo convencional (CFA). Para ello se analizaron los resultados obtenidos en pruebas de carga a pilotes SDS de escala real, realizados en Australia, Alemania y China. Consecutivamente, se analizó el incremento de la capacidad de carga y las

¹⁸ MENG, Zhen; CHEN, Jin-Jian y WANG, Jian-Hua y YIN, Zhen-Yu. Study of model test on bearing capacity of screw piles in sand. En: Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics. Septiembre, 2012. vol. 33, no. SUPPL. 1, p. 141-145.

¹⁹ LIU, Zhong; YANG, Song; Lu, Jing Chun y LI, Zhi-Yi. Full scale field load tests on bearing capacity of SDS pile and CFA pile. En: Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering. Agosto, 2010. vol. 32, no. SUPPL.2, p. 127-131.

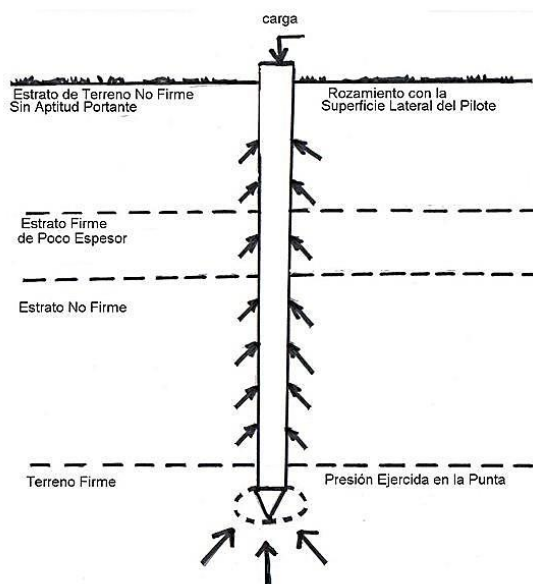
ventajas de los mecanismos utilizados en este tipo de pilotes. Los resultados de las pruebas de carga demostraron que la tecnología de perforación usada en los pilotes SDS es adecuada para suelos con condiciones amplias de compresibilidad. Además concluyeron que el efecto positivo inducido sobre el suelo desplazado por la broca, incrementa los niveles de tensión en este. Logrando de esta manera, un aumento en la capacidad de carga del pilote, gracias al incremento de la fricción superficial en el fuste.

4.2. MARCO TEÓRICO:

4.2.1. LOS PILOTES: GENERALIDADES

Los pilotes son un tipo de cimentación profunda de forma columnar (Figura 1), utilizada para recibir y transmitir las cargas de una estructura a un suelo o estrato competente. Generalmente se recurre a estos cuando los suelos más superficiales de un terreno poseen baja resistencia portante y alta compresibilidad. Por esta razón es necesario atravesar dichos estratos y alcanzar a mayor profundidad un manto rocoso o suelos firmes que disipen las cargas.

Figura 1. Esquema general de un pilote.



Fuente:

http://www.construmatica.com/construpedia/images/thumb/6/60/Pilotes_Cimentaci%C3%B3n_R%C3%ADgida_de_Seg_Orden.jpg/549pxPilotes_Cimentaci%C3%B3n_R%C3%ADgida_de_Seg_Orden.jpg

Los pilotes pueden estar empotrados con su punta dentro de un estrato estable como roca, apoyando y transmitiendo así las cargas. En ocasiones cuando en el terreno no existe un estrato competente o este se encuentra a una profundidad muy grande, los pilotes trabajan solamente por la fricción que se genera entre el fuste y el suelo circundante. Generalmente los pilotes pueden trabajar de ambas formas y su funcionamiento depende directamente de los suelos en donde son construidos.

Debido a sus complejos métodos constructivos y de diseño, realizar cimentaciones con pilotes es más costoso y complicado que con cimentaciones superficiales. En la actualidad se encuentran diferentes tipos de pilotes, los cuales varían según el material o sistema constructivo utilizado.

CASOS DE USO: Los pilotes se utilizan cuando se presentan las siguientes situaciones en un proyecto de infraestructura:

- Las condiciones del terreno no permiten que las cargas de la edificación sean transmitidas a al suelo por medio de cimentaciones superficiales.
- Los suelos pueden sufrir cambios drásticos en su estructura debido a variaciones en la humedad o temperatura. Casos como hinchamiento y retracción en arcillas expansivas.
- Las construcciones se localizan sobre el agua (pozos petroleros, muelles), o el nivel freático se encuentra muy cerca de la superficie del terreno (Figura 2).
- Las estructuras son sometidas a fuerzas laterales como vientos, impactos o sismos que generan fuerzas de levantamiento y volteo a la edificación. Estas circunstancias son comunes en torres eléctricas, de comunicación, edificios de gran altura, muros de contención, muelles, entre otros.
- Son utilizadas como recalce en cimentaciones existentes, que por diversos factores ya no cumplen su función adecuadamente y se generan asentamientos y fallas en las edificaciones.

Figura 2. Estación petrolera apoyada sobre pilotes en medio del océano.



Fuente: <http://www.energiaadebate.com/Articulos/Noviembre2009/imagenes/Knott3.jpg>

4.2.2. REFERENCIAS HISTÓRICAS DE LOS PILOTES

Muchas civilizaciones alrededor del mundo se asentaron a las orillas de ríos o grandes lagos por la facilidad de obtener agua y comida; además les permitía una forma sencilla y rápida de transportarse a otros lugares. Para mantenerse fuera del alcance del agua y animales peligrosos, estas civilizaciones construían sus casas apoyadas en troncos de madera que se encontraban dispuestos en la zona, o que ellas mismas introducían el terreno. Estos fueron los primeros usos de los pilotes y ha sido el material más utilizado por el ser humano a lo largo del tiempo; hasta que el concreto y el acero ganaron popularidad en el último siglo.

REFERENTES ANTIGUOS

Existen muchos restos arqueológicos en donde se evidencia el uso de troncos de madera como elementos de cimentación:

- Como se ve en la Figura 3, uno de los primeros usos de los pilotes se le atribuye a los fenicios, para construir muelles y construcciones en las orillas del mar como consecuencia de su comercio creciente²⁰.

Figura 3. Pintura de un asentamiento sobre la costa.



Fuente: <http://www.aeyates.co.uk/media/uploads/cat-278/header%20image%20-%20history%20of%20piling.jpg>

- Hace 12.000 años, habitantes del neolítico en donde hoy es Suiza, condujeron postes de madera en el fondo blando de lagos poco profundos, para así construir sus hogares sobre ellos²¹.

²⁰ FLEMING, Ken; WELTMAN, Austin; RANDOLPH, Mark y ELSON, Keith. Introduction. En: Piling Engineering. 3 ed. Abingdon: Taylor & Francis, 2009. 1-6 p.

²¹ PRAKASH, Shamsher y SHARMA Hari D. Introduction. En: Pile Foundations in Engineering Practice. 1 ed. Canadá: John Wiley & Sons, Inc. 1990. p 1.

- En otro asentamiento en la localidad de Robenhausen (Suiza), se estima que se usaron más de 100.000 pilotes de madera. Estos fueron encontrados bajo una capa de musgo de turba, que se calcula tardó 2.000 años en formarse.²²³
- En Lough Drumkeery (Irlanda), se encontraron en 1893 cerca de 30.000 pilotes de troncos de madera y abedul, incluyendo montones de hojas primitivas. Estos habían sido cuidadosamente ubicados y llevados a una profundidad de aproximadamente 3 metros.²³
- En China, pilotes de madera fueron usados para construir puentes en la Dinastía de Han (200 A.C – 200 D.C)²⁴.
- La primera referencia histórica sobre los pilotes se le atribuye al escritor griego Herodotus, que vivió en el cuarto siglo antes de Cristo y se le ha considerado muchas veces como el “padre de la historia”. El anotó como una tribu tracia, los Paeonians, vivían sobre casas erigidas sobre pilotes hincados en el lecho del lago. Ellos habían llegado a un acuerdo colectivo en donde cada hombre que deseaba casarse debía hincar tres nuevos pilotes en el lugar. La tribu era polígama y por lo tanto existían un número considerable de pilotes.³
- En gran Bretaña existen muchas evidencias de asentamientos romanos hechos con pilotes de madera sobre las orillas de los ríos. Durante la época medieval los pilotes de roble y aliso se utilizaron como fundaciones para grandes monasterios en terrenos pantanosos del este de Inglaterra.²⁵
- Los ingenieros romanos y griegos usaron muchos pilotes a lo largo de la costa del mar mediterráneo, evidenciados en algunos restos arqueológicos. En gran Bretaña se encontraron pilotes de un antiguo puente romano, que cruzaba 20 metros sobre el río Tyne en la provincia de Corbridge. Los pilotes fueron hechos de roble negro de aproximadamente 3 metros de longitud.
- Venecia es una de las mejores evidencias del uso de pilotes de madera. Se cree que refugiados buscaron seguridad en las islas de esta zona, escapando de los invasores bárbaros que saqueaban los restos del Imperio Romano. A inicios del siglo VIII se establecieron en la zona y muchos pilotes fueron utilizados para dar soporte a las edificaciones, que aumentaban a medida que la ciudad se hacía más próspera²⁶.

²² FLEMING. Op. Cit., p.

²³ FLEMING. Op. Cit., p.

²⁴ TOMLINSON, Michael y WOODWARD, John. General principles and practices. En: Pile Design and Construction Practice. 6 ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2014. p. 1.

²⁵ TOMLINSON. Op. Cit., p.

²⁶ FLEMING. Op. Cit., p.

- La ciudad de Ámsterdam fue fundada hace más o menos 1000 años sobre pilotes de 15 a 20 metros de longitud. Los pilotes fueron aserrados por fuera del nivel del agua y cubiertos por planchones gruesos de madera.

REFERENTES MODERNOS:

- Fue para el siglo XIX que hubieron cambios importantes en los materiales y en las formas de construcción de los pilotes.
- A mediados de 1830, se comenzaron a utilizar pilotes metálicos hechos en acero fundido. Fueron utilizados en construcciones importantes gracias a su durabilidad.
- En 1824, Joseph Aspdin patenta el cemento hidráulico, conocido posteriormente como cemento portland. Para mediados del siglo ya estaba disponible en gran magnitud y sus competidores franceses Coignet y Hennebique lograron producir con éxito el concreto reforzado, que fue introducido posteriormente a gran Bretaña por L.G. Mouchel.
- La energía del vapor fue utilizada por primera vez para perforar pilotes por John Rennie entre 1801 y 1802, para construir la “Bell Dock” a la entrada de los muelles de Londres.
- En 1870, Mr Shaw crea en Filadelfia una máquina de perforación de pilotes accionada con pólvora. Esta máquina fue resaltada por tener varias ventajas sobre los otros aparatos disponibles de la época, principalmente el hecho de que solo necesitaba de un hombre y un niño para su funcionamiento. Sin embargo no prosperó demasiado por el peligro que representaba.
- En 1897 A.A Raymond patento su propio sistema de pilotaje, siendo el primer sistema económico de fundición en situ de pilotes. Seguido en 1903, R.J. Beale desarrolló un método de perforación con una tubería de acero mientras vaciaba concreto a través de ella y posteriormente era retirada. Años más tarde, en 1908 el belga E. Frankignoul desarrolló los primeros sistemas de pilotes Franki, que lograrían bases ensanchadas y gran popularidad en todo el mundo.
- En 1908 la empresa americana Bethlehem Steel Co. desarrolló pilotes en acero con secciones H. Las cuales inundaron el mercado e impulsaron durante las décadas siguientes el desarrollo de los sistemas de hinca.²⁷
- A mediados de los años 40, con el desarrollo de los cementos hidráulicos y los avances en los métodos de perforación, los pilotes fundidos en situ eran más apetecidos y rentables en el mercado. A partir de los años 50 los avances tecnológicos permitieron utilizar ambos sistemas, haciendo de cada uno adecuado para circunstancias específicas.

²⁷ FLEMING. Op. Cit., p.

➤ Con el desarrollo de los sistemas computarizados, hoy en día es posible ser más precisos y eficientes construyendo cimentaciones con pilotes. El desarrollo de sistemas especializados de exploración de suelos, sistemas de extracción de materiales, bombeo de concreto, hinca de pilotes y métodos de diseños confiables, han permitido reducir costos de construcción, mejorar la seguridad de trabajadores y la estabilidad de las edificaciones.

4.2.3. TIPOS DE PILOTES:

Actualmente existen numerosas formas de clasificar a los pilotes. Estos pueden variar según las características de su estructura o la forma en que son concebidos. Una de las formas en que se diferencian es según su material, el sistema constructivo y su funcionamiento. En la Tabla 1 se presenta una matriz que relaciona de manera general los diferentes tipos de pilotes que pueden existir.

Tabla 1. Diferentes combinaciones de tipos de pilotes.

	TIPOS DE PILOTES SEGÚN SU:				
	MATERIAL	SISTEMA CONSTRUCTIVO		FUNCIONAMIENTO	
VARIEDADES DE LOS TIPOS DE PILOTES	CONCRETO	PRE FABRICADOS-HINCADOS	PRE-EXCAVADOS Y FUNDIDOS EN SITU	POR PUNTA	FRICCIÓN EN EL FUSTE
	ACERO		X		
	MADERA		X		

Fuente: Autor.

PILOTES SEGÚN SU MATERIAL:

Existen tres materiales principales para la creación de pilotes. Escoger el más adecuado para un proyecto depende de la influencia que tiene el suelo y las condiciones del terreno sobre la integridad del elemento a utilizar.

➤ **PILOTES DE MADERA:**

Durante muchos años fue utilizada como base en grandes puentes ferroviarios, bodegas, muelles de carga, entre otros. Sin embargo, debido a las grandes construcciones erigidas en las últimas décadas, su uso ha disminuido notoriamente. Hoy se utiliza en edificaciones más pequeñas, provisionales o artesanales. Una de las aplicaciones más comunes de los pilotes de madera es en cimentaciones de muelles como se observa en la Figura 4.

Figura 4. Muelle sostenido sobre pilotes de madera.



Fuente: <http://media-cdn.tripadvisor.com/media/photo-t/06/a5/4a/06/ocean-city-beach.jpg>

Este tipo de cimentación funciona muy bien en condiciones de completa humedad o suelos completamente secos, debido a su fácil deterioro por agentes biológicos y químicos. Sin embargo, existen diferentes métodos de protección e impermeabilización que prolongan su vida de uso.

Las dimensiones de los pilotes de madera dependen directamente del tipo de árbol de donde son obtenidos. Las secciones transversales de un elemento pueden ser cuadradas o circulares, según sea la geometría del tronco utilizado. La longitud de un pilote de madera puede ser hasta de 20 metros, sin embargo existen sistemas de conexión entre varios pilotes para alcanzar profundidades mayores.

➤ PILOTES DE CONCRETO:

El concreto es uno de los materiales más utilizados en la actualidad para fabricar cimentaciones con pilotes. Así mismo es muy fácil disponer de él y es económicamente rentable en la mayoría de los casos. Está constituido por cemento portland, agregados pétreos (finos-gruesos) y agua. Las resistencias generalmente utilizadas varían entre 3000 psi y 5000 psi, según las solicitaciones del proyecto.

Los pilotes en concreto deben estar constituidos de una armadura de refuerzo, para que sean capaces de resistir fuerzas de compresión, tensión, cortante y torsión. Se pueden construir dos tipos de pilotes en concreto: *prefabricados* y *fundidos en situ*.

- **Pilotes prefabricados de concreto:** son elementos que se funden en un molde específico, en donde se dispone la armadura de refuerzo y se vierte el concreto. También pueden ser hechos en concreto pretensado, en el cual el refuerzo en acero está sometido a esfuerzos de tensión mientras es vertido el concreto. Este tipo de pilotes puede tener secciones transversales cuadradas o similares a un círculo (hexagonales, octogonales). En la Figura 5 se observa un grupo de pilotes prefabricados en concreto de sección cuadrada.

Figura 5. Pilotes prefabricados en concreto de sección transversal cuadrada.



Fuente: <http://informationcells.com/wp-content/uploads/2015/04/Precast-Reinforced-Concrete-Piles-pix.jpg>

Los pilotes prefabricados son un tipo de pilote de desplazamiento y son sometidos a impactos en su cabeza para ser instalados en el terreno. Esta es

una de las consideraciones que se tiene en cuenta en el momento del diseño estructural del elemento.

- **Pilotes en concreto fundido en situ:** En este tipo de pilotes el concreto es vertido en un agujero previamente hecho como se observa en la Figura 6. También disponen de una armadura de refuerzo en acero. Existen diferentes sistemas de inyección de concreto que dependen del tipo de excavación realizada.

Figura 6. Vertimiento de concreto en la excavación de un pilote.



Fuente: <http://1.bp.blogspot.com/-8xZeIB-d2vI/UOZeLHKDcEI/Placing+concrete+in+pile+in+Tremie+method.jp>

La sección transversal de este tipo de pilotes es de forma circular debido a las brocas utilizadas para su excavación. El refuerzo utilizado sobresale en la superficie del elemento para ser conectado posteriormente con el encepado.

➤ **PILOTES EN ACERO:**

El acero es un material utilizado ampliamente desde la revolución industrial y se caracteriza por tener excelentes propiedades mecánicas, por ende es comúnmente utilizado en la fabricación de pilotes. Como se observa en la Figura 7, los pilotes en acero son en base a tubos circulares o secciones transversales tipo “H”. Estos son un tipo de pilotes de desplazamiento, los cuales son instalados en el terreno por medio de impactos en la cabeza del elemento.

Figura 7. Pilotes en acero con sección H y circulares



Fuente: http://i00.i.aliimg.com/img/pb/207/048/570/570048207_038.jpg

PILOTES SEGÚN SU FUNCIONAMIENTO:

➤ **Pilotes que trabajan por punta:** Son aquellos que están incrustados o empotrados dentro de un estrato firme o un manto de roca, de esta manera se apoyan directamente en estas capas y transmiten las cargas por medio de su punta. Esta es la situación ideal que se desea en cualquier cimentación con pilotes, ya que su funcionamiento es más seguro y eficiente.

➤ **Pilotes que trabajan por fricción:** En ocasiones los estratos más adecuados para soportar las cargas se encuentran a profundidades muy extensas y hacen económicamente imposible construir los pilotes; o simplemente no se encuentra en la zona un estrato con capacidad suficiente para resistir las solicitaciones de la estructura. Cuando esto sucede, los pilotes son utilizados para transmitir las cargas gradualmente al estrato presente por medio de la fricción generada entre el suelo y el fuste del pilote.

Este tipo de pilotes son conocidos como pilotes flotantes o de fricción, y existen diferentes variedades de ellos. Generalmente se utilizan en suelos granulares con altos valores en su ángulo de fricción.

➤ **Pilotes combinados:** son aquellos que transmiten las cargas a los suelos por medio de su punta y la fricción en el fuste.

PILOTES SEGÚN SU SISTEMA CONSTRUCTIVO:

➤ Prefabricados – Hincados en el sitio

Estos pilotes se caracterizan porque su estructura está construida antes de ingresar en el suelo y pueden ser de concreto, acero o madera. Son instalados por medio de golpes e impactos generados con martillos o martinetes. Estos están ubicados en grúas como se observa en la Figura 8. El procedimiento es conocido como *hincado* o *hinca* y es de los sistemas utilizados más antiguos.

Figura 8. Hincado de un pilote de concreto.



Fuente: http://img.archiexpo.es/images_ae/photo-g/pilote-hincado-hormigon-armado-prefabricado-70177-1574761.jpg

Estos también son conocidos como pilotes de desplazamiento ya que al ir ingresando en el terreno, desplazan y compactan el material circundante alrededor de su cuerpo. Esta es una característica favorable para las propiedades del suelo, pues en ocasiones mejora sus parámetros mecánicos y su interacción con el fuste del pilote.

Estos pilotes se utilizan en diferentes tipos de proyectos y es muy común verlos en instalaciones portuarias y plataformas petroleras en el mar o grandes lagos. Aunque su uso es muy común tienen una gran desventaja debido a las vibraciones y ruidos producidos en su instalación, que pueden afectar la integridad de edificaciones cercanas. Por esta razón muchas veces es necesario utilizar otro tipo de métodos de construcción e instalación.

Una de estas alternativas son pilotes en acero con hélices a lo largo del fuste, y son introducidos al terreno por medio de rotación. Utilizan el mismo principio de un tornillo o broca y son conocidos como “*Screw piles*” (Figura 9).

Figura 9. Instalación de un pilote de desplazamiento por medio de rotación.



Fuente: <http://i.ytimg.com/vi/Kx7H1YJT44s/maxresdefault.jpg>

Actualmente en países como Corea, Japón o China, algunos centros de investigación y empresas constructoras están desarrollando pilotes prefabricados en concreto con geometría roscada. Sin embargo debido a las características del concreto y el gran tamaño de los elementos, se presentan fallas estructurales por la torsión necesaria en su instalación.

➤ **Pilotes pre excavados fundidos in situ**

Se caracterizan por que el concreto es fundido en excavaciones realizadas en el lugar del proyecto, donde los suelos y rocas son extraídos o desplazados por medio de barrenos y brocas especiales de perforación. Existe gran variedad de métodos constructivos para este tipo de pilotes, que dependen de factores como: la estabilidad del terreno para mantener las paredes de la excavación, las condiciones de humedad y el nivel freático de la zona.

Los sistemas de perforación se pueden dividir en dos grupos generales: por desplazamiento y por extracción del material.

Perforación con desplazamiento de material:

Es cuando se realiza por medio de brocas que desplazan y compactan el suelo hacia las paredes de la excavación, de esta manera no hay residuos de material en la superficie del proyecto. Este sistema no permite comprobar la naturaleza del terreno atravesado. Los principales sistemas por desplazamiento son:

- Pilotes de desplazamiento con azuche: Se construyen utilizando una tubería metálica hueca y extraíble, la cual lleva adherida en su punta un azuche para penetrar en el terreno. La tubería es hincada por impactos en su cabeza y cuando es alcanzada la profundidad de diseño, se introduce la armadura de acero y se vierte el concreto mientras es extraída la tubería, mientras el azuche se queda en la parte baja del pilote como apoyo.
- Pilotes de desplazamiento con tapón de gravas: Este sistema es ejecutado por medio de un tubo de acero hueco e hincado hasta la profundidad de diseño, que en su parte inferior está relleno con un tapón de gravas y concreto. Cuando llega a la profundidad deseada, es aplicada una presión sobre el tapón, que genera un ensanche (conocido como bulbo) en la punta del pilote.
- Pilotes de desplazamiento tipo “ATLAS”: Este es un tipo de pilote desarrollado en los años 60's por la empresa belga “Franki Foundations”, que gracias a una novedosa broca, desplaza el material del suelo y lo compacta mientras va creando un perfil helicoidal en las paredes de la excavación, obteniendo un pilote como se observa en la Figura 10. De esta manera se mejora la interacción entre el suelo y el fuste del pilote, y consecutivamente, aumenta la capacidad de carga última del elemento. También lo hacen eficiente para resistir fuerzas de arranque y levantamiento, generadas por estructuras de gran altitud. La capacidad de carga admisible de este tipo de pilotes varía entre 1000 kN y 2000 kN en compresión, y hasta 1000 kN en tensión.²⁸

²⁸ DE COCK, F. Y IMBO, R. Atlas screw pile: a vibration-free, full displacement, cast-in-place pile. En: Transportation Research Board. 1994. p. 49-62.

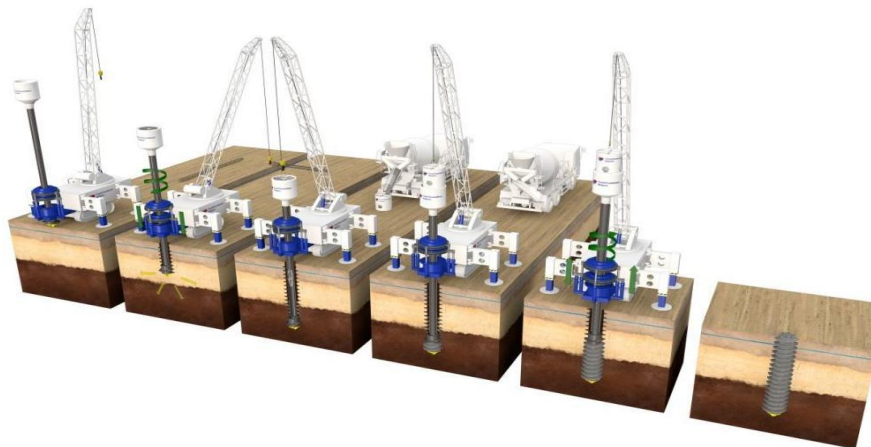
Figura 10. Fuste de un pilote tipo "Atlas".



Fuente: <http://www.geoforum.com/info/pileinfo/images/atlas2.jpg>

Como se observa en la Figura 11, su procedimiento constructivo inicia cuando la broca (que está sujeta a una tubería metálica), perfora en el terreno hasta alcanzar la profundidad deseada. En seguida, la armadura en acero se introduce en la tubería, y posteriormente de la punta de la broca se desprende un tapón por donde el concreto (que es vertido desde la superficie a través de la tubería) comienza a salir; al mismo tiempo la broca gira en sentido contrario y es extraída mientras la perforación se va llenando con el concreto.

Figura 11. Proceso constructivo de un pilote Atlas



Fuente: <http://www.ffgb.be/Business-Units/Piles/Atlas.aspx>

Este es un tipo de pilotes muy utilizado en Europa y Asia; sin embargo en Sur América es casi nula su aplicación, debido a que empresas como “Franki Foundations” son de las pocas con la tecnología y experiencia adecuada para su ejecución.

Perforación por extracción de material:

En este proceso se desintegra y posteriormente se extraen los suelos o rocas hacia la superficie, por medio de barrenos, cucharas o trépanos que son utilizados según el tipo de terreno existente. A continuación se presentan los principales métodos de construcción de pilotes de extracción de material:

- Pilotes de extracción con entubación recuperable: Se utiliza una tubería metálica que sostiene las paredes de la excavación a medida que esta crece. Posteriormente se extrae el material perforado con barreno, cuchara o trépano, (según sea el caso), se introduce la armadura de refuerzo y se vierte el concreto. Finalmente se extrae la tubería de la excavación generando golpes sobre ella, para facilitar el vibrado del concreto.
- Pilotes de extracción con camisa perdida: Presenta la misma metodología explicada en el numeral anterior, diferenciándose únicamente en que la tubería metálica se queda dentro de la excavación haciendo parte del cuerpo del pilote. Este sistema constructivo es utilizado en cimentaciones bajo el agua, o en suelos con agentes degradantes para el concreto.
- Pilotes de extracción sin entubación con lodos tixotrópicos: En esta metodología la perforación es rellenada (a medida que crece) con lodos tixotrópicos, que gracias a sus propiedades expansivas contienen las paredes de esta. Cuando se alcanza la profundidad de diseño, se limpia la base de la excavación, se introduce la armadura de refuerzo y es vertido el concreto desde el fondo por medio de una tubería tremie. Debido a que el concreto es mucho más denso que los lodos, este queda en la parte baja desplazándolos hacia arriba a medida que se va llenando la perforación.
- Pilotes barrenados sin entubación: Estos se realizan por medio de un barreno que perfora en terrenos estables, libres de flujos de agua, y se extrae el suelo suelto hacia la superficie. Posteriormente se introduce la armadura de

refuerzo y se vierte el concreto por medio de tubería tremie. Es uno de los sistemas constructivos, más económico y sencillo del mercado.

- Pilotes barrenados y hormigonados por el tubo central del barreno: Se realizan por medio de un barreno hueco de hélice continua (continuous flight auger, CFA), el cual se introduce en el terreno hasta la profundidad deseada y posteriormente es retirado (sin rotación) extrayendo con él, el material atrapado en sus hélices. Al mismo tiempo es vertido el concreto por la tubería interna del eje del barreno, de esta manera sostiene las paredes de la excavación. Finalmente se introduce la armadura de refuerzo, que no siempre desciende totalmente debido a la densidad del concreto.

4.2.4. LOS MICROPILOTES:

Es un tipo de cimentación que trabaja bajo los mismos principios de los pilotes, pero tienen dimensiones reducidas, con diámetros entre 100 mm y 250 mm. Es una alternativa a los sistemas de cimentaciones actuales debido a que la maquinaria utilizada para su ejecución es de menor tamaño, permitiéndola entrar a edificaciones con poco espacio y terrenos reducidos como se observa en la figura 12. Adicionalmente es utilizada como recalce y refuerzo en cimentaciones existentes.

Figura 12. Recalce de una cimentación dentro de una edificación existente.



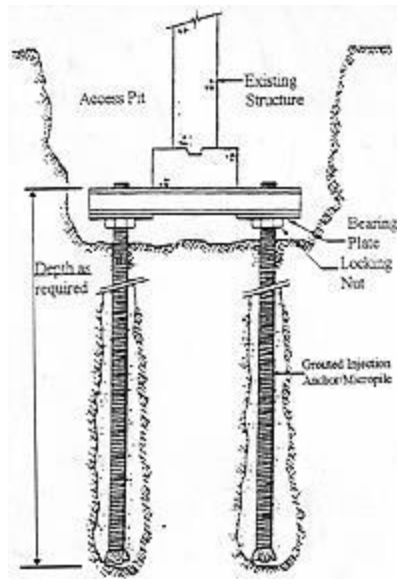
Fuente: http://www.zakladani.cz/images/9_pazeni_stav_jam_mikrozap/3_.jpg

Los micropilotes pueden ser de materiales como acero, concreto o madera; y sus métodos constructivos son muy similares a los pilotes, simplemente que utilizan equipos y maquinaria de menor tamaño.

PRINCIPALES APLICACIONES:

- Como nueva fundación de estructuras dentro de edificaciones existentes que presentan espacio reducido. Así mismo, como fundación en nuevos proyectos de edificación.
- Como recalce y reforzamiento a cimentaciones existentes, más aún si se encuentran dentro de una edificación (Figura 13).

Figura 13. Esquema de recalce de una cimentación.



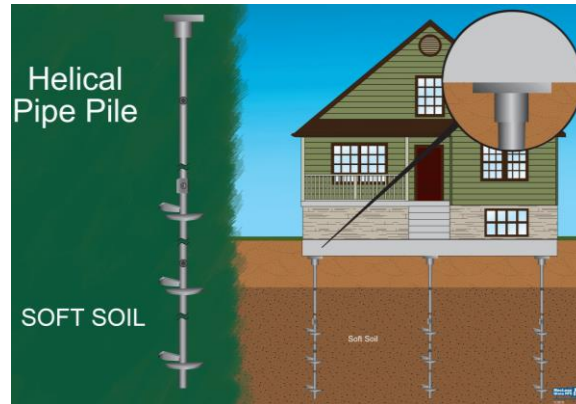
Fuente: http://www.geogROUTINC.com/images/s6_2.jpg

- Como fundación trabajando a tracción, para soportar fuerzas de arranque o levantamiento.
- Como método de estabilización de taludes.
- Como pantallas de entibación para obras con poco espacio.

TIPOS DE MICRO PILOTES:

- Micro pilotes roscados en acero: son elementos tubulares en acero que poseen hélices a lo largo de su eje. Estos son instalados en el terreno por medio de rotación. Son muy comunes para estructuras pequeñas o reforzamiento de cimentaciones existentes (Figura 14).

Figura 14. Micro pilotes roscados de acero.



Fuente: http://www.macleandixie.com/UserFiles/Image/New_photos_images/Residencial_Piles_Pipe.gif

- Micro pilotes fundidos en situ: Estos pueden ser excavados por medio de un barreno, posteriormente se introduce la armadura de refuerzo y se vierte el concreto. Otra alternativa es perforando por medio de un tubo metálico hueco, y se vierte el concreto en su interior; de esta manera el tubo hace la función de refuerzo en el pilote.
- Micro pilotes hincados: Son elementos prefabricados de acero, concreto o madera que se introducen al terreno por medio de golpes en su cabeza.

4.2.5. PRUEBAS DE CARGA SOBRE PILOTES:

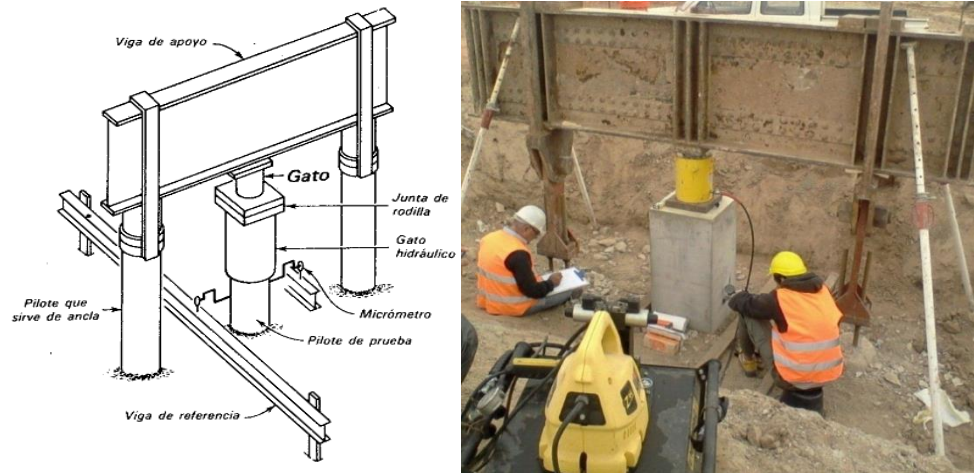
Estas pruebas son utilizadas para determinar la capacidad de carga última de un pilote ya instalado en el terreno. Son ejecutadas en la mayoría de las construcciones, antes de hacer el pilotaje y así ajustar el diseño de los elementos; o posterior al pilotaje como mecanismo de control y comprobación de la carga establecida en los métodos de diseño, de esta manera se puede continuar con el desarrollo seguro de la edificación.

Como objetivo principal, se realizan para analizar su comportamiento geotécnico, y consisten en registrar la magnitud de los asentamientos generados por cargas

aplicadas directamente sobre ellos. Las solicitaciones empleadas son proporcionales a las cargas de servicio que van a sufrir en la realidad. Actualmente existen dos tipos de pruebas de carga sobre pilotes:

➤ **Pruebas de carga estática:** En este tipo de prueba se aplica una carga estática y continúa sobre el cabezal del pilote, que debe sobresalir una distancia suficiente para efectuar el ensayo y medir los asentamientos ocurridos. Como se observa en la Figura 15, se utiliza una estructura porticada que permite ejercer presión sobre el pilote por medio de una bomba o “gato” hidráulico. Así mismo, se utilizan piezómetros o celdas de carga para registrar la carga aplicada; y deformímetros que muestran el asentamiento ocurrido.

Figura 15. Prueba de carga estática a un pilote.



Fuente: <http://4.bp.blogspot.com/-W4Wlqn4NCq8/UK5PQkndOKI/AAAAAAAAAGiQ/7cfwkuGGLaY/s1600/3.gif>

➤ **Pruebas de carga dinámica (PDA):** Esta prueba determina la carga axial última de un pilote y su integridad física, por medio de golpes generados en la caída libre de una masa o martillo sobre su cabeza. Se basa en la teoría de propagación de ondas que son producidas por el impacto aplicado, estas recorren todo el elemento y son reflectadas cuando encuentran una restricción en el suelo. La magnitud de la velocidad y fuerza de las ondas es medida por medio de sensores ubicados en la cabeza del pilote, que dirigen los datos a un sistema computacional. La Figura 16 muestra una prueba de carga dinámica sobre un pilote, y algunos instrumentos utilizados en su ejecución.

Figura 16. Ejecución de una prueba de carga dinámica a un pilote.



Fuente: <http://pile.com/pdi/images/dropHammers/fullsize/APPLE%20Firstpile-%20GL%20r2.JPG>

Las pruebas PDA presentan una mayor información en comparación con las pruebas estáticas, ya que separan la capacidad de carga resistida por la punta y el fuste del pilote. Así mismo describen la distribución de fricción a lo largo de este. Además la prueba identifica la magnitud y ubicación de irregularidades presentes en el cuerpo del pilote.

5. METODOLOGÍA

5.1. TIPO DE MÉTODO:

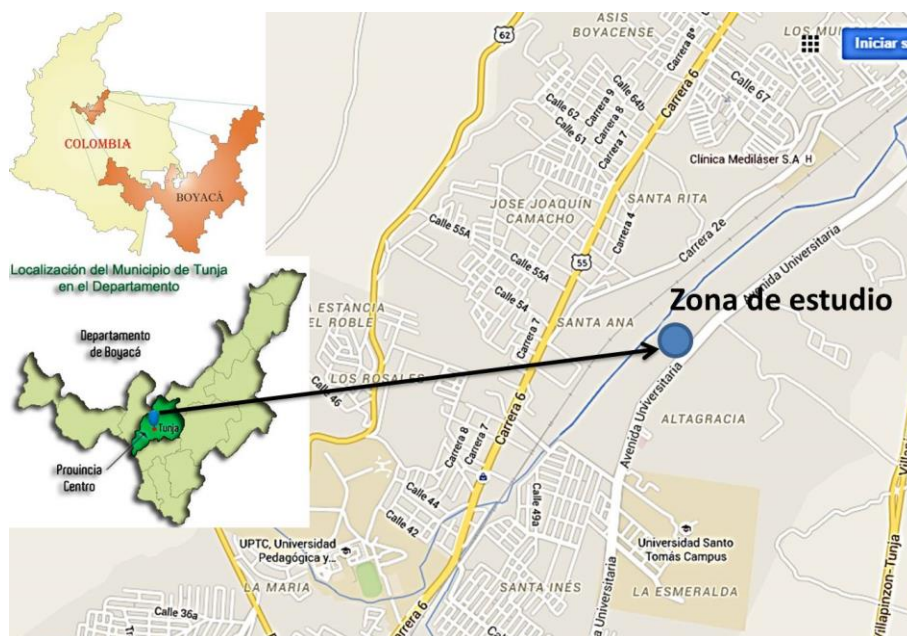
Para esta investigación se utilizó un método cuantitativo, el cual fue referencia para la toma de datos y análisis de resultados en cada uno de los ensayos ejecutados. Además todas las conclusiones y opiniones establecidas en el presente documento, fueron establecidas por resultados numéricos basados en principios teóricos y académicos. Por tal razón un análisis subjetivo ante los parámetros analizados, no aplica para el cumplimiento de los objetivos planteados.

5.2. INVESTIGACIÓN DEL SUBSUELO

5.2.1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Esta investigación se realizó en la ciudad de Tunja, capital del departamento de Boyacá; que se ubica geográficamente a $05^{\circ}32'07''$ de latitud Norte y $73^{\circ}22'04''$ de latitud oeste sobre la cordillera oriental Colombiana. En la figura 17 se muestra la ubicación de la zona de estudio dentro del territorio nacional.

Figura 17. Localización de la zona de estudio.



Fuente: Google Earth

La zona de estudio se encuentra ubicada sobre la Avenida Universitaria No.53-155; y geográficamente a $05^{\circ}33'31.38''$.

5.2.2. GEOLOGÍA

La configuración geológica que conforma la ciudad de Tunja y sus alrededores comprende en su mayoría rocas sedimentarias de diferentes edades, iniciando en el periodo *Jurásico* con la *Formación Arcabuco*, y subyaciendo esta unidad se localiza una amplia sucesión de secuencias sedimentarias pertenecientes al periodo *Cretácico inferior* con algunas variaciones litológicas. En los alrededores de Tunja se encuentran formaciones del *cretácico superior*, el cual presenta un espesor importante de secuencias sedimentarias. Así mismo, también se encuentran abanicos aluviales y depósitos aluviales.²⁹

5.2.2.1. Estratigrafía: Regionalmente al sitio de estudio se puede encontrar que el municipio de Tunja está constituido por diferentes materiales tanto de formación como de depósitos geológicos. Regionalmente al lote de estudio se pueden encontrar diversas formaciones del terciario dentro de las que se encuentran la formación Tilatá, formación Cacho, formación Guaduas y formación Bogotá. De la misma manera se encuentran diversos depósitos del cuaternario dentro de los que se encuentran los de tipo Aluvial, Coluvial y de fluvio-lacustre. En la Tabla 2 se enseñan las diferentes formaciones y depósitos de la ciudad de Tunja, así como su descripción y simbología.

²⁹ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE BOYACÁ; UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA. Investigación de las aguas subterráneas en marco de la implementación parcial de los planes de manejo y protección de los acuíferos de Tunja y Duitama, formulación del manejo ambiental de las aguas subterráneas-termo minerales de Paipa. Tunja, Boyacá. 2012

Tabla 2. Geología de la ciudad de Tunja y sitios aledaños.

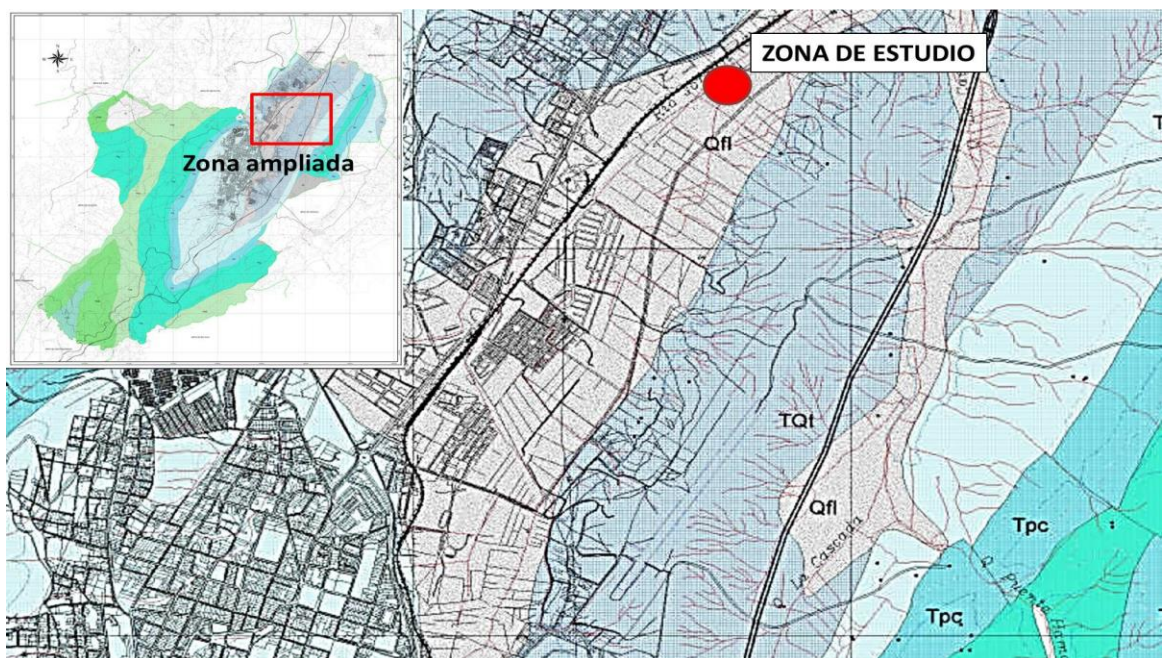
EDAD	UNIDAD	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
CUATERNARIO	Depósito Aluvial	Qal	Aluviones
	Depósito Fluvio-lacustre	Qfl	Depósitos no consolidados de limos constituidos por intercalaciones de arena y arcilla de color carmelita y con oxidaciones rojizas.
	Depósito Coluvial	Qc	Constituido por grandes bloques depositados por gravedad, embebidos en una matriz areno arcillosa.
TERICIARIO	Formación Tilatá	Tqt	Gravas, arenas, arcillas, esporádicas capas de lignito.
	Formación Bogotá	Tpb	Areniscas cuarzosas prevalecientes, lodolitas subordinadas.
	Formación Cacho	Tpc	Areniscas cuarzosa de color amarillo a pardo oscuro, de grano fino a medio, presentado algunos niveles conglomeráticos.
	Formación Guaduas	Tkg	Lodolitas prevalecientes, niveles de areniscas cuarzosas, capas de carbón.
CRETÁCICO	Grupo Guadalupe-Formación Labor y Tierna	Ksgl	Shales grises oscuros prevalecientes con intercalaciones de arenisca.
	Grupo Guadalupe-Planers	Ksgp	Porcelanitas, chert, shales, arcillas, caolinitas, areniscas cuarzosas, fosforita en proporciones variables
	Formación Conejo	Kscn	Niveles de shales grises oscuros prevalecientes y niveles de areniscas cuarzosas.
	Grupo Churuvita	Ksch	Areniscas cuarzosas, shales negros, calizas en proporciones variables según lugares. Limonitas síliceas en el techo.

Fuente: POT Tunja, 2001.

En la Figura 18 se observa una ampliación del mapa geológico de la ciudad de Tunja. En la figura se observan las diferentes formaciones y depósitos en los alrededores de la zona de estudio, la cual se encuentra ubicada sobre el depósito **Fluvio-lacustre (Qfl)**.

Según Agudelo y Castro, este depósito: “Se encuentra formando los valles de los ríos Chulo y La Cascada. Presenta una morfología de relieve suave a plano; son depósitos no consolidados y su composición varía lateralmente, así como la granulometría de sus elementos; situación que refleja la frecuente variación de la intensidad de las corrientes hídricas que los depositaron. Sobre el eje del sinclinal su espesor alcanza unos 37 m; los materiales que lo componen están constituidos por intercalaciones de arena y arcilla de color carmelita y con oxidaciones rojizas, lo que sugiere la alternancia de episodios lacustres y fluviales en su formación. Estos depósitos reposan discordantemente sobre la formación Tilatá ocupando los paleocauces definidos por el relieve post-erosivo, esto significa que la fase fluvio-lacustre es netamente posterior a la sedimentación de la formación Tilatá, es decir del pleistoceno superior”.³⁰

Figura 18. Geología de la zona de estudio.



Fuente: Mapa geológico de Tunja, Alcaldía de Tunja.

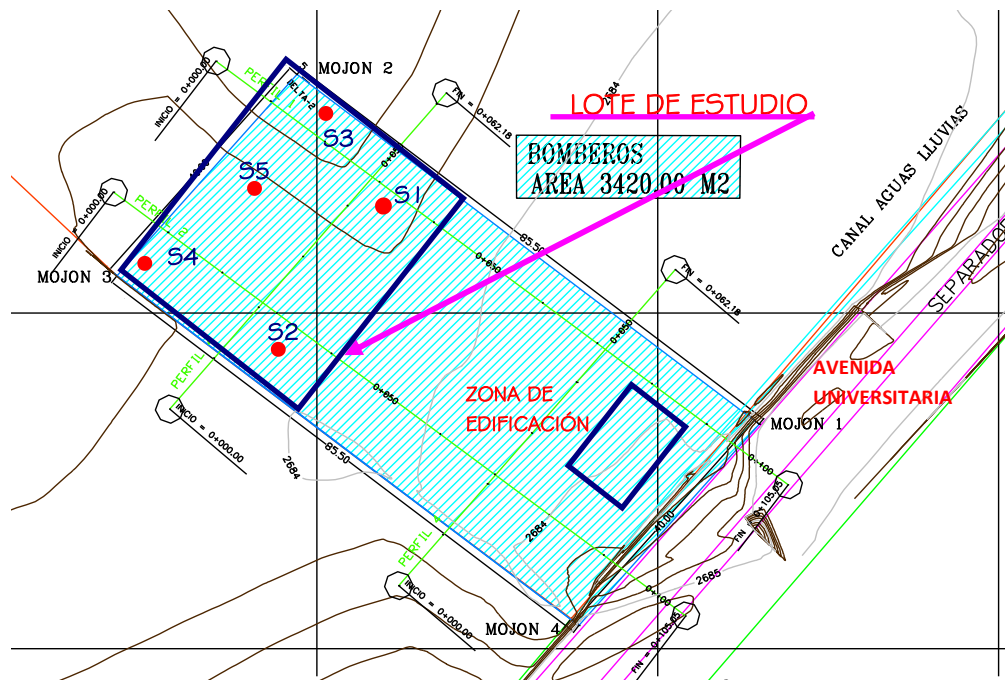
³⁰ AGUDELO, Adriana y CASTRO, Martín A. Estudio de vulnerabilidad sísmica de la ciudad de Tunja. Tesis de grado. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). 1999.

5.2.3. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

Para determinar las condiciones geotécnicas del subsuelo, la estratificación y las condiciones de agua subterránea, se realizaron 5 sondeos distribuidos en la zona de estudio como se muestra en la Figura 19. Estos se ejecutaron por medio de equipo de perforación manual para la obtención de muestras alteradas e inalteradas con tubos de pared delgada tipo shelby. Adicionalmente se efectuaron ensayos de campo de penetración estándar SPT. De la misma manera se obtuvieron muestras remodeladas para realizar ensayos de clasificación.

Con base a las muestras inalteradas se realizaron ensayos de corte directo y compresión confinada; de esta manera determinar las propiedades mecánicas de cada estrato representativo del subsuelo. En la figura 19 se observa la distribución de los sondeos sobre el lote de estudio.

Figura 19. Localización de los sondeos en la zona de estudio.



Fuente: Autor.

Para llevar a cabo los ensayos de penetración estándar, se utilizó un peso estándar del martinete de 311.2N y en cada golpe este tuvo una altura de caída de 762mm. Es de recordar que el número de golpes requeridos para los dos últimos intervalos se suman para dar el número de penetración estándar a la profundidad indicada de acuerdo con la norma ASTM D-1586. En la Figura 20 se observan algunas imágenes representativas de la exploración geotécnica.

Figura 20. Imágenes de la exploración geotécnica en el sitio de estudio.



Fuente: Autor.

5.2.4. ENSAYOS DE LABORATORIO

Sobre un número representativo de las muestras obtenidas en campo, se efectuaron diferentes ensayos de laboratorio para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos encontrados. Así mismo corroborar las propiedades de consistencia y resistencia establecidas por medio de los ensayos SPT. En la Tabla 3 se presenta el número y tipo de ensayos efectuados para cada sondeo y en la sección de análisis se registran los resultados obtenidos.

Tabla 3. Ensayos de laboratorio efectuados a cada sondeo.

ENSAYO	S1	S2	S3	S4	S5
Profundidad de sondeo (m)	5.10	5.05	3.10	5.25	4.15
Humedad natural	7	6	3	8	6
Límites de Atterberg	4	3	2	3	3
Lavado sobre tamiz N° 200	5	3	2	3	3
Corte directo	1	-	3	2	2
Compresión inconfiada	2	1	2	3	2
Ensayos de penetración estándar	-	-	2	3	2

Fuente: Autor.

- **Humedad natural:** Se realizaron ensayos de humedad natural en base a la norma ASTM D-2216 – 98 como se observa en la Figura 21. Estos se aplicaron a las muestras alteradas e inalteradas de cada uno de los sondeos. Se obtuvieron altos valores de humedad debido a la poca profundidad del nivel freático y la cercanía al río La Vega.

Figura 21. Ensayo de humedad natural.



Fuente: Autor

- **Límites de Atterberg:** Estos se realizaron a las muestras obtenidas cada 1.50 metros de profundidad o en cada cambio de estrato representativo de cada sondeo. De esta manera se estableció el límite líquido, límite plástico, índice de

plasticidad e índice de liquidez para cada muestra según la ASTM D-4318. En la Figura 22 se observa la ejecución de un ensayo hecho por el autor.

Figura 22. Ensayo de Limites de Atterberg.



Fuente: Autor.

➤ **Lavado sobre tamiz N° 200:** Este se realizó como se indica en la Figura 23, a las muestras obtenidas cada 1.50 metros de profundidad o en cada cambio de estrato representativo de cada sondeo en base a la ASTM C117.

Figura 23. Lavado de muestras con el tamiz N° 200.



Fuente: Autor.

- **Ensayo compresión inconfiada:** Se realizaron en base a la norma ASTM D-2266 a las muestras de cada estrato representativo de los sondeos. En la Figura 24 se observa la ejecución de un ensayo por parte del autor.

Figura 24. Ensayo de compresión inconfiada.



Fuente: Autor.

- **Ensayo de corte directo:** Para realizar este ensayo se aplicaron cargas de 1, 2 y 4 Kg. De esta manera representar los posibles esfuerzos generados en las pruebas de carga en campo a los micropilotes. Se realizaron los ensayos en base a la norma ASTM D-3080.

Figura 25. Ensayo de corte directo.



Fuente: Autor.

5.3. CONSTRUCCIÓN DE LOS MICROPILOTES

Para llevar a cabo la construcción de los micropilotes, el autor utilizó un procedimiento empírico que se ajustara a las condiciones técnicas y económicas disponibles. Durante el transcurso de la investigación, fue necesario construir dos lotes de micropilotes roscados con diferencias en el refuerzo longitudinal y transversal utilizado en cada uno. Esto debido a una circunstancia presentada en el desarrollo del proyecto. Más adelante, se describen los cambios efectuados y las razones que llevaron al autor hacia estos. Sin embargo a continuación se describe el procedimiento utilizado para la construcción de los micropilotes propuestos, siendo el mismo para los dos lotes de prototipos realizados:

5.3.1. Construcción de un modelo patrón para los micropilotes:

Para la construcción de los micropilotes el autor diseñó un molde que se ajustara a la geometría establecida, teniendo en cuenta que no se encuentra en el mercado nacional disponibilidad de estas. Para esto se fabricó un modelo en acero con las dimensiones necesarias como se aprecia en la Figura 26. Su longitud total fue de 0.80 metros ya que es la longitud en donde está ubicado el sistema de roscas en los micropilotes. De esta manera el modelo se utilizó para crear dos moldes que permitieron fundir el concreto en ellos.

Figura 26. Modelo en acero con las dimensiones establecidas para los micropilotes.



Fuente: Autor

5.3.2. Construcción de una formaleta para crear los moldes:

Para la fabricación de los moldes el autor construyó una formaleta con láminas metálicas, en donde se colocó el modelo en acero y se vació la mezcla de concreto. En la Figura 27 se observan algunas imágenes de su fase constructiva.

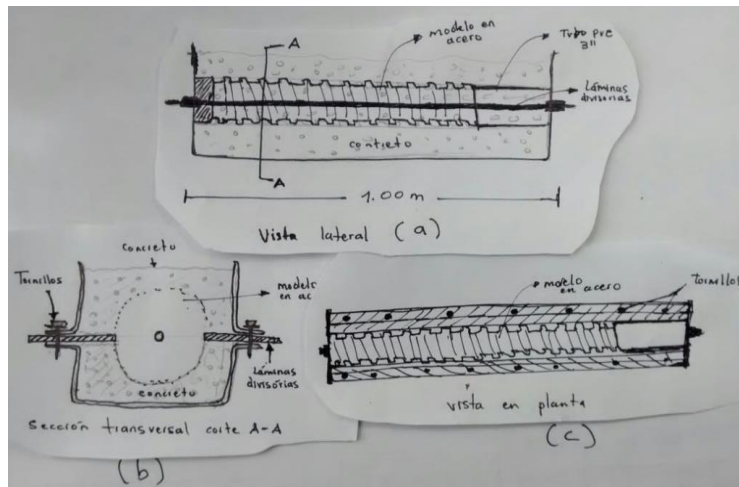
Figura 27. Imágenes del proceso constructivo de la formaleta metálica.



Fuente: Autor

En la Figura 28 se observan las dimensiones establecidas para la formaleta, la cual estaba compuesta por varias piezas desarmables ajustadas con tornillos. El modelo en acero estaba suspendido de sus extremos para que el concreto rodeara toda su superficie tal como se observa en la Figura 29 (a). Adicionalmente a media altura de la formaleta se ubicaron dos láminas metálicas que separaron en dos partes su volumen interno, Figura 28 (b). De esta manera se obtuvieron dos piezas del molde con una cara del modelo en cada una de estas.

Figura 28. Dimensiones de la formaleta metálica.



Fuente: Autor.

5.3.3. Construcción de los moldes de concreto

Para la construcción de los dos moldes requeridos se utilizó un concreto de 21 MPa, reforzando cada pieza de este con una armadura de acero corrugado que soportara cargas a flexión en su manipulación. Así mismo se utilizó la formaleta metálica ubicando el modelo en acero y el tubo de PVC en sus extremos. En la figura 29 se observan los elementos ubicados antes de realizar la mezcla de concreto.

Figura 29. Ubicación de la armadura de refuerzo y del modelo en acero dentro de la formaleta metálica.



Fuente: Autor.

Se realizó la mezcla de concreto según las especificaciones de diseño y se vació dentro de la formaleta metálica mientras se golpeaban las paredes del elemento con un martillo de caucho para expulsar burbujas de aire. En la figura 30 se muestra el proceso de fundida.

Figura 30. Vaciado de concreto dentro de la formaleta metálica para los moldes.



Fuente: Autor

Se obtuvieron finalmente dos moldes de concreto con dos piezas cada uno, los cuales se extrajeron de la formaleta metálica y se les dio el correcto curado al material. Posteriormente se realizaron algunas correcciones en las roscas con plastilina y se pintaron las caras internas. En la figura 31 se muestran algunas piezas terminadas.

Figura 31. Piezas de los moldes terminadas



Fuente: Autor

5.3.4. Construcción del refuerzo en espiral

Para el refuerzo transversal de los micropilotes se utilizaron dos tipos de espirales en acero corrugado. La primera espiral se construyó con barra número 2 de 0.64 mm y la segunda con grafil de 5 mm de diámetro. Los dos tipos de espirales fueron figuradas por el autor en un torno industrial como se muestra en la Figura 32. La razón por la cual se fabricaron dos tipos de espirales, se debe a una modificación en el diseño estructural de un segundo grupo de micropilotes fabricados. En el capítulo 8.4 se describe con detalle las circunstancias que llevaron al autor a realizar este cambio en el diseño.

Figura 32. Construcción de una espiral de acero corrugado..



Fuente: Autor.

La espiral N°1 se figuró con un sentido de roscado a favor de las manecillas del reloj y una separación entre espirales de 10 centímetros aproximadamente. La espiral N°2 se figuró en sentido contrario a las manecillas del reloj y con una separación entre espirales de 1 pulgada aproximadamente. Para figurar una espiral N°2 se utilizó una barra de grafil de 5 mm de diámetro y 12 metros de longitud, que fueron necesarios para obtener una espiral de un metro de longitud entre extremos. El diámetro de los dos tipos de espirales fue de 5.50 centímetros aproximadamente, con el fin de mantener un recubrimiento adecuado al momento de fundir el concreto en los moldes. En la figura 33 se muestran los dos tipos de espirales fabricadas, evidenciando las diferencias en diámetros de acero y la separación entre espirales.

Figura 33. Comparación entre los dos tipos de espirales fabricados, N°1 y N°2 respectivamente.



Fuente: autor.

Como refuerzo longitudinal se amarraron 4 grafiles de 4 milímetros de diámetro y 1.00 metro de longitud a cada espiral N° 2. De esta manera se rigidizaron las espirales y se generó una zona de confinamiento para el concreto que fue fundido en los micropilotes. En la figura 34 se muestra el proceso de amarre de los elementos de acero y un detalle de la espiral N°2.

Figura 34. Armado de la espiral del refuerzo y acero longitudinal.



Fuente: Autor.

5.3.5. Diseño de la mezcla de concreto

Para diseñar la mezcla de concreto aplicada en la construcción de los micropilotes, el autor siguió la metodología establecida por la norma ACI 211.1. De esta manera se obtuvieron las proporciones de cemento, arena, grava y agua necesarias para fabricar un concreto de 21 MPa (3000 psi). A continuación se describen los parámetros principales aplicados a la metodología de diseño:

1. Establecer el asentamiento: La fluidez y manejabilidad de una mezcla de concreto se puede medir por medio del asentamiento que presente. Determinar el valor correcto para una mezcla depende del espacio disponible dentro de la zona donde este se va a fundir y el tipo de vibrado que se vaya a aplicar. En el caso de este proyecto la separación entre el refuerzo, y el área interna de los moldes fue muy limitada, impidiendo un vibrado suficiente de la mezcla. Por esta razón y con base en la tabla ____, se estableció un asentamiento de 150.0 mm medidos según el ensayo del cono de Abrams. De esta manera se evitaron vacíos y hormiguo en la mezcla.

Tabla 4. Valores de trabajabilidad del concreto para diferentes tipos de estructuras.

Compactación	Consistencia	Asentamiento (mm)	Fluidez (%)	Tipo de estructura
Vibro compactación	Muy rígida	0-10	10 – 30	Pavimentos para tránsito pesado, con fuerte vibración. Elementos prefabricados.
Alta vibración	Rígida	20-40	30 – 50	Pavimentos con máquina terminadora vibratoria. Cimentaciones de hormigón masivo, secciones poco reforzadas y vibradas, muros no reforzados.
Vibración normal	Plástica	50-90	50 – 70	Muros de contención reforzados, cimentaciones, pavimentos compactados normalmente, losas, vigas y columnas poco reforzadas
Baja vibración	Fluida	100-150	70 – 100	Secciones muy reforzadas (vigas, losas, columnas), muros reforzados, hormigón a colocar en condiciones difíciles.
Sin vibración	Líquida	>150	>100	Hormigón transportado por bombeo, hormigón autonivelante, no se recomienda vibrarlo.

Fuente: Giraldo (2006).

2. Resistencia de diseño f'_{cr} : La resistencia de la mezcla de concreto depende directamente de la experiencia de la persona que la fábrica. Para eso es necesario disponer de resultados de ensayos a compresión en cilindros fabricados con materiales, procedimientos y condiciones muy similares a los que se utilizarán en la nueva mezcla. De acuerdo a esto, es posible establecer una

desviación estándar de los ensayos y determinar el f'_{cr} de acuerdo a la sección C.5.3.2.1 del Título C de la NSR-10.

Sin embargo para el desarrollo de la investigación el autor no disponía de un registro de ensayos a compresión con las mismas condiciones y materiales a utilizar en la mezcla de concreto. Por tal razón se estableció el valor de f'_{cr} de acuerdo a la sección C.5.3.2.2 del Título C de la NSR-10 (Tabla 5), donde establece que para concretos entre 21 MPa y 35 MPa se adiciona 8.3 MPa al f'_c establecido inicialmente. Siendo el f'_c establecido para la mezcla de concreto de 21 MPa, el f'_{cr} aplicado en el diseño fue de 29.3 MPa.

Tabla 5. Resistencia promedio a la compresión, requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra.

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'_c < 21$	$f'_{cr} = f'_c + 7.0$
$21 \leq f'_c \leq 35$	$f'_{cr} = f'_c + 8.3$
$f'_c > 35$	$f'_{cr} = 1.10f'_c + 5.0$

Fuente: Título C, sección C.5.3.2.2 de la NSR-10.

3. Caracterización de los agregados: las características de los agregados finos y gruesos a utilizar en una mezcla de concreto, son muy importantes para realizar los cálculos de diseño. Por tal razón el ACI 211.1 establece que se deben realizar los siguientes ensayos a los agregados y que fueron llevados a cabo por el autor:

- Tamaño máximo de agregado grueso: Se realizó con base en la ASTM D136
- Módulo de finura, según ASTM D136 para agregado fino.
- Humedad de absorción, según ASTM C128-93 para agregado fino.
- Densidad en bruto seca y humedad de absorción. Se realizó con base en la ASTM C127-93. (Para agregado grueso y fino)
- Humedad superficial: Se realizó con base en la ASTM C566-89. (Para agregado grueso y fino)
- Masa unitaria seca y compactada con varilla. Se realizó con base en la ASTM C29M-91a. (Para agregado grueso)

Los ensayos mencionados se realizaron solamente para el agregado grueso. Ya que el agregado fino utilizado es proveniente de la cantera Bertha Jiménez de la vereda el Moral en el municipio de Tunja, se utilizó la caracterización establecida según HERNANDEZ Daniela y VILLAMIL Cindy (2015) para el mismo agregado proveniente del mismo lugar. En la figura 35 se puede observar la realización de algunos ensayos de caracterización del agregado grueso.

Figura 35. Ensayo de tamaño máximo de agregado y densidad en bruto seca respectivamente.



Fuente: Autor

Se obtuvo la siguiente caracterización mostrada en las tablas 6 y 7, de los agregados de acuerdo a los cálculos de cada ensayo. En los anexos se presentan los formatos con los cuales se realizó cada ensayo.

Tabla 6. Resultados de ensayos de caracterización del agregado grueso.

ENSAYO	RESULTADO
TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO	10 mm
DENSIDAD EN BRUTO SECA	2.404 g/cm ³
HUMEDAD DE ABSORCIÓN	1.87%
HUMEDAD SUPERFICIAL	N.A
MASA UNITARIA SECA Y COMPACTADA CON VARILLA	1512.7 g/cm ³

Fuente: Autor.

Tabla 7. Resultados caracterización agregado fino.

ENSAYO	RESULTADO
MODULO DE FINURA	2.72 %
DENSIDAD APARENTE	2.65 g/cm ³
DENSIDAD NOMINAL	2.66 g/cm ³
HUMEDAD DE ABSORCIÓN	0.42%
HUMEDAD SUPERFICIAL	N.A

Fuente: HERNANDES, VILLAMIL (2015)

Con base en los parámetros establecidos previamente, se realizó el diseño de la mezcla siguiendo todos los procesos establecidos en el ACI 211.1. Finalmente en la tabla 8 se muestran las cantidades obtenidas para fabricar un metro cubico de concreto de 21 MPa.

Tabla 8. Peso de los materiales requeridos para fabricar 1 m³ de concreto de 21 MPa.

Cemento (Kg)	Agua (Kg)	Arena (Kg)	Grava (Kg)
436.50	222.61	853.37	693.43

Fuente: Autor.

5.3.6. Adecuación de los moldes

Antes de preparar y fundir el concreto de los micropilotes, los moldes se adecuaron para evitar la adherencia de la mezcla con estos. De acuerdo a esto se untó grasa en la cara interna de cada pieza y se forraron con plástico vinipel las piezas de los moldes como se muestra en la figura 31.

Figura 36. Adecuación de los molde de concreto.



Fuente: Autor.

Posteriormente los moldes se ubicaron verticalmente sobre una superficie plana y se introdujeron las espirales en acero como se muestra en la figura 37. Finalmente se ajustaron las dos piezas de cada molde y se aseguraron en el lugar de trabajo.

Figura 37. Espirales de refuerzo y moldes preparados para fundir el concreto.



Fuente: Autor.

5.3.7. Preparación de la mezcla de concreto:

En este proceso el autor mezcló de manera manual las cantidades de cemento, grava, arena y agua requeridas para cada fundida. Así mismo se comprobó la fluidez requerida de cada mezcla por medio de la prueba del cono de Abrams. En la figura se puede observar parte de este procedimiento.

Figura 38. Elaboración de la mezcla de concreto.



Fuente: Autor.

5.3.8. Control de calidad del concreto

Con el fin de garantizar la calidad del concreto se realizaron 4 cilindros de concreto por cada fundida de micropilotes, con el fin de realizar pruebas de compresión a dos cilindros a 7 o 14 días y dos a 28 días. Adicionalmente se comprobó el asentamiento de cada mezcla por medio de la prueba del cono de Abrams. En la figura 39 se observa parte del proceso de control de calidad.

Figura 39. Prueba de asentamiento y elaboración de cilindros de concreto



Fuente: Autor

5.3.9. Fundición del concreto en los moldes

La mezcla de concreto se introdujo por la boca de los moldes y se distribuyó internamente con una varilla de punta redondeada como se muestra en la figura 40. Consecutivamente se golpeó la superficie externa de cada pieza para vibrar el concreto y expulsar las burbujas de aire en él. La punta del micropilote se realizó con la punta de una botella plástica de 3 pulgadas de diámetro.

Figura 40. Fundición del concreto dentro de los moldes.



Fuente: Autor.

Los micropilotes lisos fueron contruidos de igual manera que los micropilotes roscados, pero se utilizaron tubos de PVC de 3 pulgadas de diámetro como moldes. Estos prototipos fueron fundidos con los micropilotes roscados. En la figura 41 se observan dos tubos de PVC con el concreto y la espiral dentro de estos.

Figura 41. Micropilotes lisos en los moldes de tubo PVC.



Fuente: Autor.

5.3.10. Desencofrado y curado de los micropilotes y cilindros de concreto:

Después de 24 horas de fraguado, los micropilotes se extrajeron de los moldes para posteriormente ser sumergidos en agua y realizar el proceso de curado. La extracción de los micropilotes roscados fue un proceso complejo y de bastante cuidado, debido a que las roscas de los elementos se rompían con facilidad. Además que las roscas de los micropilotes con la de los moldes aferraron demasiado los elementos. Finalmente con suficiente delicadeza en la manipulación, se extrajeron los micropilotes roscados como se observa en la figura 42.

Figura 42. Micropilote extraído del molde de concreto.



Fuente: Autor.

Así mismo se extrajeron los micropilotes lisos, abriendo en dos partes el tubo de PVC con una pulidora eléctrica. En la 43 figura se observa un micropilote liso extraído del molde.

Figura 43. Extracción de un micropilote liso de su molde.



Fuente: Autor.

En seguida los micropilotes y los cilindros de concreto se sumergieron en el estanque del laboratorio de la Universidad, empezando de esta manera el proceso de curado. En la figura 44 se observan algunos micropilotes y cilindros sumergidos.

Figura 44. Curado de cilindros y micropilotes de concreto.



Fuente: Autor.

5.3.11. Falla de cilindros de concreto:

Con el fin de verificar la resistencia del concreto utilizado en cada lote de micropilotes, se realizaron pruebas de compresión a los cilindros de cada fundida. El procedimiento de las pruebas se llevó a cabo de acuerdo a la norma ASTM C-39, y se realizaron a los 7, 14 y 28 días de la fecha en se efectuó la fundida de los micropilotes. Se efectuaron ensayos a 2 cilindros por día, para comprobar la calidad de cada muestra. En la figura 45 se observa la realización de una prueba de compresión a un cilindro de concreto.

Figura 45. Prueba de compresión a un cilindro de concreto.



Fuente: Autor.

6. CALCULO TEÓRICO DE LA CAPACIDAD DE CARGA POR FRICCIÓN

Con el fin de establecer una capacidad de carga última de referencia para las pruebas de carga-desplazamiento en los micropilotes, el autor realizó el cálculo teórico con base a la cohesión del estrato donde se pensaban instalar. Para esto el método que más se adaptó a las condiciones reales de la investigación fue el método “Alfa” (α), el cual es aplicado a suelos arcillosos y requiere del valor de la cohesión del suelo, el diámetro de la cimentación y la longitud total efectiva de empotramiento de la cimentación dentro del terreno. Según AZIZI (2007), la capacidad de carga de un pilote está dada por la siguiente expresión:

$$Q_u = Q_s + Q_p$$

Dónde:

Q_u : Es la capacidad de carga última del pilote

Q_s : Es la capacidad de carga por fricción

Q_p : Es la capacidad de carga en la punta del pilote.

Ya que en el presente proyecto solo se estudia la capacidad de carga por fricción y los micropilotes no estuvieron apoyados en su punta, la capacidad de carga última de los prototipos será:

$$Q_u = Q_s$$

Según la literatura, se establece que la capacidad de carga por fricción está dada por la siguiente expresión:

$$Q_s = A_s \alpha C_u$$

Dónde:

Q_s : Es la capacidad de carga por fricción

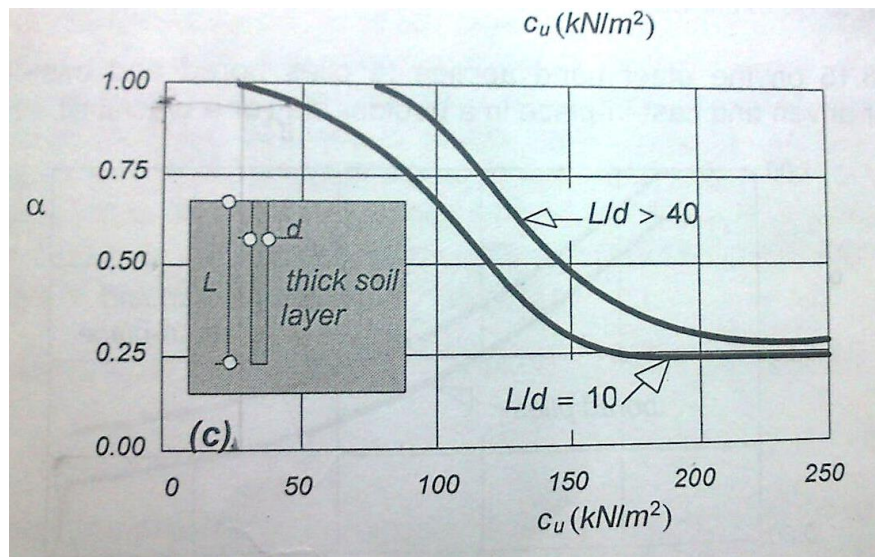
A_s : πdL (Área de contacto del pilote)

C_u : Es la cohesión no drenada del suelo donde está la cimentación.

α : Factor de adhesión en función a la cohesión del suelo.

El factor de adhesión α puede ser establecido por medio la gráfica mostrada en la figura 46.

Figura 46. Gráfica para la estimación de α según cohesión del suelo.



Fuente: AZIZI (2007)

Con base en los fundamentos teóricos expuestos, es posible determinar la capacidad de carga por fricción que en teoría deben resistir los micropilotes roscados y lisos. Estos resultados se enseñan en la sección 8.3.

6.1. Determinación del área de contacto:

Para realizar el cálculo de la capacidad de carga por fricción de cada tipo de micropilote propuesto, es necesario determinar el área de contacto para cada uno. En los micropilotes lisos es muy sencillo, pues se debe multiplicar el perímetro del elemento por la longitud de empotramiento. Sin embargo en los micropilotes roscados se realizó el siguiente procedimiento:

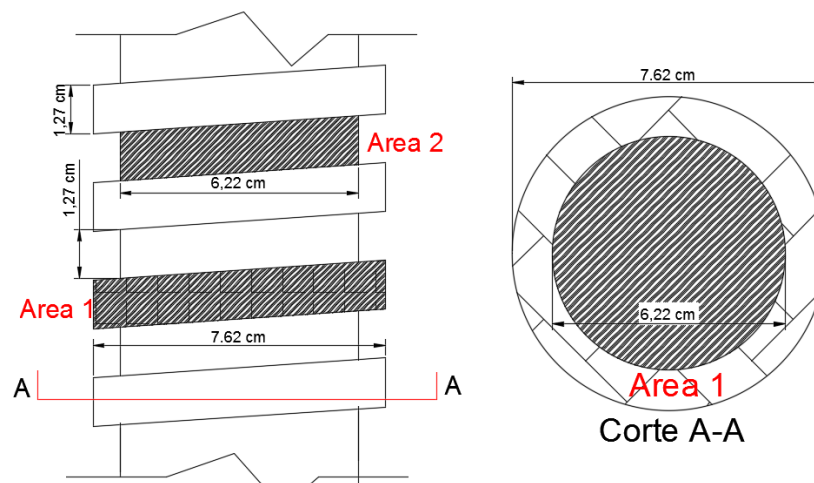
Los micropilotes tienen un paso de rosca de una pulgada, esto significa que en la longitud efectiva del micropilote hay 31 crestas de roscas y 31 hendiduras. De acuerdo a la figura, el micropilote roscado presenta tres áreas de contacto diferentes a lo largo del fuste, que sumadas hacen el área de contacto total del elemento.

Área 1: que es el espesor de una rosca (1/2 pulgada o 1,27 cm) multiplicada por el perímetro de la misma.

Área 2: Es la espesor de una hendidura (1/2 pulgada o 1,27 cm) multiplicada por el perímetro de la misma.

Área 3: De acuerdo al corte A-A de la figura 47, es el área superficial de las roscas del micropilote. Esta área se puede obtener de la diferencia entre el área del círculo más grande y el área del círculo pequeño del corte A-A. Dicha área está presente en la parte inferior y superior de cada rosca del elemento.

Figura 47. Detalle de las áreas efectivas de un micropilote roscado.



Fuente: Autor.

Las áreas 1 y 2 se multiplican 31 veces cada una, por la cantidad de roscas que hay en el fuste del elemento. El área 3 se multiplica por 62 veces ya que está en la parte superior e inferior de una rosca. En la tabla se presentan el resumen de las áreas, y el área total efectiva de un micropilote roscado.

Tabla 9. Áreas efectivas de un micropilote roscado

	Área efectiva micropilote roscado (m2)
Área 1	0.094
Área 2	0.077
Área 3	0.094
Área total	0.266

Fuente: Autor.

7. PRUEBAS DE CARGA-DEFORMACIÓN EN CAMPO

7.1. INSTALACIÓN DEFINITIVA DE LOS MICROPILOTES EN EL TERRENO

El procedimiento de instalación expuesto a continuación fue aplicado a los dos tipos de micropilotes roscados contruidos. Sin embargo fue exitoso solamente para los segundos prototipos, por lo cual las imágenes, análisis y observaciones expuestas a continuación hacen referencia a estos únicamente. Posteriormente en la sección de análisis se exponen las razones, circunstancias y detalles de la instalación de los primeros micropilotes y su falla estructural.

Al momento de introducir los micropilotes en la zona de estudio, el terreno se encontraba inundado como se observa en la figura 48, por tal razón los estratos más superficiales estaban saturados. Esta situación fue ideal para las condiciones de análisis establecidas en los objetivos de la investigación, ya que el suelo se encontraba en su estado más compresible. Además permitió una instalación más rápida de los micropilotes. Primero se estableció donde se ubicarían los 8 micropilotes en el terreno, verificando que se cumpliera la separación mínima entre elementos, y que esta garantizara espacio suficiente para ubicar el equipo para las pruebas de carga de campo.

Figura 48. Estado del lote en el momento de instalación de los pilotes.

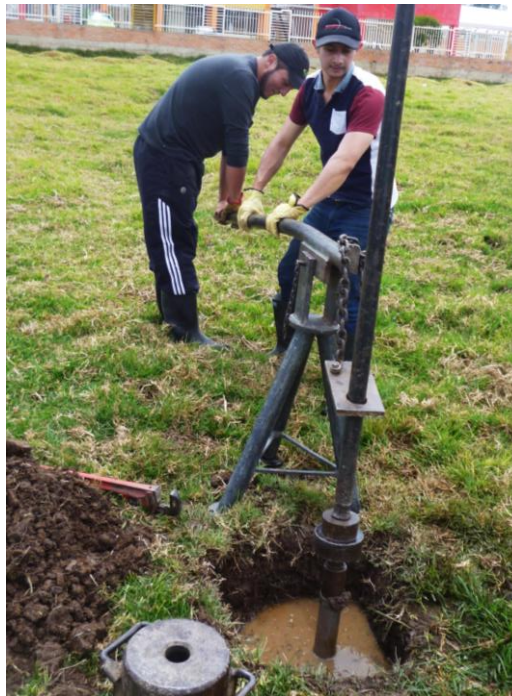


Fuente: Autor.

Con el fin de facilitar el ingreso de los micropilotes y disminuir el esfuerzo de torsión en su estructura, se realizaron perforaciones con equipo de perforación manual, de 6 centímetros de diámetro y 2.50 metros de profundidad para la instalación de cada micropilote. De esta manera también se garantizó que los elementos no quedaran apoyados en su punta, permitiendo que la transmisión

de cargas hacía el suelo fuera por medio del fuste del elemento. En cada excavación se realizó una caja de 45 x 45 cm de lado y 25 centímetros de profundidad, para retirar la carpeta vegetal y el suelo orgánico. A partir de este punto se ingresaron los micropilotes. En la figura 49 se muestra el proceso descrito anteriormente.

Figura 49. Excavación y apertura de los prehuecos para la instalación de los micropilotes



Fuente: Autor.

La idea de hacer un hueco de diámetro menor (6 centímetros) al de los micropilotes (8.5 centímetros en promedio), se estableció con el fin de facilitar el ingreso de estos, disminuyendo de esta manera los esfuerzos de torsión y evitar fallas en su estructura. Adicionalmente al ser menor el diámetro del prehueco, el micropilote desplaza el suelo circundante a medida que ingresa en el terreno, y de esta manera se garantiza que el suelo penetre dentro de las roscas del fuste. Esto permite que haya una mejor interacción entre el suelo y el micropilote.

Para ingresar los micropilotes en el terreno, se utilizó un dispositivo manual fabricado por el autor, el cual se acopló a la cabeza de cada micropilote como se muestra en la figura 50. Cada micropilote se instaló inmediatamente se realizaba un prehueco, debido a que las paredes de este tendían a relajarse, cerrando levemente el hueco y haciendo más difícil el ingreso de los elementos. Esto se evidenció con el primer micropilote introducido, ya que inicialmente se hicieron varias excavaciones consecutivas antes de introducir el elemento. Por lo tanto se decidió hacer la corrección para el resto de los micropilotes.

Figura 50. Dispositivo utilizado para la instalación de los micropilotes.



Fuente: Autor.

Al momento de terminar una excavación, se colocó la punta del micropilote en la boca del hueco y este se comenzó a girar (utilizando el dispositivo acoplado) en el sentido de las manecillas del reloj. De esta manera el micropilote ingresó progresivamente en el terreno de forma similar a un tornillo cualquiera. El tiempo promedio gastado para la instalación de un micropilote fue de dos minutos, y se necesitó solamente la fuerza de una persona para el ingreso del elemento. En la figura 51 se observa la instalación de uno de los micropilotes y en los anexos audiovisuales se evidencia todo el proceso registrado en videos.

Figura 51. Instalación de los pilotes roscados.



Fuente: Autor.

Debido a la fricción entre el fuste y el suelo, la fuerza necesaria para introducir los micropilotes fue mayor a medida que ingresaban en el terreno. Estos se introdujeron hasta que las roscas del fuste estuvieron completamente adentro del suelo, es decir 80 centímetros. Sin embargo, en dos micropilotes faltó por ingresar 4 centímetros de las roscas, debido a que el suelo circundante los prensó considerablemente. Por lo tanto se temía que pudieran romperse los micropilotes debido a la torsión necesaria para ingresarlos completamente.

De acuerdo a la información revisada, y al comportamiento del suelo observado en el momento de la instalación de los micropilotes, se decidió dejarlos en reposo durante mínimo 8 días antes de realizar las pruebas de carga en campo.

Esto se hizo con el fin de permitir un reacomodamiento del suelo alrededor del fuste y mejorar la interacción del micropilote con el suelo.

7.1.1. INSTALACIÓN DE LOS MICROPILOTES LISOS

Para la instalación de los micropilotes lisos, también se realizaron excavaciones previas tal cual como se hizo con los micropilotes roscados. Sin embargo estos se introdujeron al terreno por medio de presión aplicada sobre su cabeza, como se enseña en la figura 52. A medida que los micropilotes ingresaban al terreno, la fuerza necesaria para introducirlos fue aumentando debido a la fricción con el suelo, por esta razón fue necesario utilizar una pesa de 76 kilos para introducirlos hasta la profundidad deseada. Los micropilotes se introdujeron aproximadamente 80 centímetros dentro del suelo, igual que en los micropilotes roscados.

Figura 52. Instalación de los pilotes lisos.



Fuente: Autor.

7.1.2. FALLA ESTRUCTURAL EN LOS PRIMEROS MICROPILOTES

Al momento de hacer el análisis estructural de los micropilotes, se ignoró la relación que tiene la dirección del roscado del micropilote en el terreno, con el comportamiento de los esfuerzos de torsión generados sobre el elemento durante este proceso. Por tal razón no se tuvo en cuenta la dirección de la espiral de refuerzo que soporta estos esfuerzos.

Debido a esto se construyeron unos micropilotes con una espiral de refuerzo con el mismo sentido del roscado del elemento. De estos prototipos, dos que se intentaron ingresar en el terreno presentaron fallas estructurales a los largo del fuste como se observa en la figura 53.

Figura 53. Falla estructural en un micropilote roscado.



Fuente: Autor.

7.2. EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS DE CARGA

Debido que a nivel comercial las pruebas de carga en pilotes cuestan mucho dinero, el autor desarrolló un sistema que permitiera generar carga sobre los micropilotes, y de esta manera registrar el desplazamiento vertical y sus cargas correspondientes.

Para generar la carga vertical sobre los elementos se utilizó un gato hidráulico, el cual se apoyó sobre la cabeza de cada micropilote y debajo del chasis de una volqueta doble troque cargada, tal como se observa en la figura 54. El peso aproximado del vehículo fue de 15 toneladas. Esto generó un contrapeso ante la fuerza del gato hidráulico y permitió que fueran los micropilotes los que se desplazaran hacia abajo.

Figura 54. Doble troque cargada utilizada como contrapeso.



Fuente: autor.

La volqueta se ubicó en reversa para colocar su parte posterior sobre cada micropilote, y de esta manera apoyar el gato hidráulico en la parte más pesada del vehículo. En la figura 55 se observa el montaje del sistema de carga utilizado por el autor y a continuación se describe cada elemento que lo integra.

Figura 55. Sistema de carga establecido por el autor.



Fuente: Autor.

Para registrar la carga aplicada se utilizó una celda electrónica de carga de 20 toneladas de capacidad. Esta fue conectada a un indicador digital el cual mostró la carga (en kilogramos) aplicada en tiempo real a los elementos. Para representar el desplazamiento vertical de los micropilotes, se adhirió una regla de 1 mm de precisión a cada uno de estos, colocando en un punto fijo un esfero sobre los indicadores de medida de la regla. De esta manera se observó el desplazamiento que tuvo cada micropilote al momento de aplicar las cargas. En la figura 56 se muestra la celda de carga utilizada y la regla de medida con el punto fijo.

Figura 56. Celda de carga y montaje con regla y punto fijo.



Fuente: Autor.

Para la ejecución de cada prueba se colocó sobre la cabeza de los micropilotes, placas de madera y acero que permitieron acomodar el gato hidráulico y la celda con respecto al chasis de la volqueta. Estos elementos fueron tenidos en cuenta como una sobrecarga inicial a los micropilotes, y se sumó su peso a los valores de carga registrados en cada prueba. Adicionalmente antes de comenzar cada ensayo se presentó otra pequeña sobrecarga en los micropilotes, ya que para ajustar los elementos se tuvo que generar una presión con el gato hidráulico. Ya con los elementos ubicados correctamente, se aplicó la carga en el gato hidráulico de una manera constante y rítmica, siendo igual para todos los micropilotes. Cada prueba se ejecutó hasta que el micropilote ensayado se desplazara verticalmente 10 centímetros dentro del terreno.

Para registrar los desplazamientos correspondientes de cada carga, se grabó en video la ejecución de cada prueba. Capturando de esta manera el indicador de carga y la regla de medida en un mismo plano del video. En la figura 57 se muestra la ejecución de una prueba de carga mientras es registrada en video, adicionalmente se observan cada uno de los elementos utilizados en el ensayo.

Figura 57. Ejecución de una prueba de carga.



Fuente: Autor.

Para realizar el análisis a las pruebas, se registraron las cargas y desplazamientos en intervalos de tiempo de un segundo cada uno. Esto se logró deteniendo los videos a cada segundo y anotando los valores mostrados para ese intervalo de tiempo. De esta manera se obtuvieron un gran número de datos que conformaron diferentes gráficas. Al realizar este proceso se asumió como segundo número “1”, el momento en cada video donde se comenzó a aplicar la carga al micropilote. Las gráficas y análisis de estas pruebas se presentan en la sección de análisis y resultados. De igual manera los datos registrados de carga y desplazamiento de cada micropilote se presentan en los anexos del documento.

8. ANÁLISIS Y RESULTADOS

8.1. ESTUDIOS DE SUELOS:

Topografía:

En el momento de realizar la exploración geotécnica el terreno presentó una superficie regular sin la existencia de rellenos y con diferencias de nivel no mayores a 0.8 metros.

Perfil estratigráfico:

- Superficialmente se encuentra una capa de tierra negra varias con raíces y capa vegetal, con espesor promedio de 0.25 m.
- Luego se encuentra un estrato de arcilla arenosa color café con trazas grises, de consistencia firme y de alta plasticidad, y que llega a profundidades que varían entre 0.9 y 1.0 m bajo la superficie..
- A continuación se encuentra una capa de arcilla color gris oscuro, de consistencia blanda y alta plasticidad, en donde se evidencia olor de residuos orgánicos, que alcanza una profundidad entre los 2.70 y 3.50 metros bajo la superficie.
- Por último aparece un estrato de arcilla negra de consistencia blanda y de alta plasticidad, hasta la profundidad donde se realiza la exploración geotécnica.

Caracterización:

A continuación se muestran las propiedades físicas y de clasificación de las muestras recogidas en la exploración geotécnica.

Tabla 10. Propiedades físicas y mecánicas de las muestras obtenidas.

Sondeo	M No.	PROFUNDIDAD (m)	PROPIEDADES INDICE						% PASA TAMIZ	CLASIFICACION	Rp (Kg/cm ²)
			LL (%)	LP (%)	IP (%)	Wn (%)	IL (%)	CU (Kg/cm ²)	No. 200		
1	1	0.8-0.9	43.4	23.9	19.5	27.16	16.8	0.53	94.83	CL	1.05
1	2	1.6-1.70	56	32.6	23.4	34.82	9.46	0.6	99.84	MH-OH	1.21
1	4	2.9-3.0	52.5	28.6	23.9	29.28	2.89	-	99.85	MH-OH	-
1	6	3.9-4.5	61.8	33.8	28	42.2	30	-	99.66	MH-OH	-
2	1	1.05-1.10	49.2	26.7	22.5	34.11	33	0.4	98.08	CL	0.8
2	3	2.45-2.55	54.6	28.1	26.5	35.53	25	-	99.57	CH	-
2	5	4.1-4.2	60	29.6	30	45	51	-	98.72	MH-OH	-
3	1	0.5-1.00	43	30.7	12	23.5	-57	0.4	89.05	ML	0.8
3	2	2.10-2.20	54	0	54	35.9	67	-	98.69	CL-ML	
4	1	0.5-0.9	35	20.2	15	24.7	31	0.46	92.71	CL	0.93
4	5	2.35-2.80	54	30	24	29.2	-	-	99.31	MH-OH	-
4	7	4.65-5.0	60	38	18	43.1	28	0.68	99.32	MH-OH	1.36
5	1	1.05-1.10	35	17.9	17	18.8	1.2	1.32	77.47	CL	2.63
5	3	2.45-2.55	50	29.3	18	28.4	-0.4	0.48	99.4	ML	0.95
5	5	4.1-4.2	61	40.9	20	56.34	77	-	98.98	MH-OH	-

Fuente: Autor

8.2. RESULTADOS DE FALLA DE CILINDROS

A continuación se presenta en la tabla 11 los resultados obtenidos de las pruebas de compresión a los cilindros efectuados en el momento de la fundida de los micropilotes. Las edades de falla se alteraron ya que se decidió fallar los últimos cilindros el día que se instalaron los micropilotes en el terreno. En la figura 58 se observan algunos cilindros fallados

Figura 58. Cilindros de concreto fallados



Fuente: Autor

Tabla 11. Resultados de resistencia de los cilindros de concreto.

Código Cilindro	Fecha moldeo	Fecha falla	Edad en días	Esfuerzo máximo (Kgf/cm ²)	% f'c = f'c actual/ f'c esperado
F1C107	11/04/2015	21/04/2015	10	223.00	106%
F1C207	11/04/2015	21/04/2015	10	228.00	109%
F1C314	11/04/2015	27/04/2015	16	253.00	120%
F1C414	11/04/2015	27/04/2015	16	230.00	110%
F1C528	11/04/2015	29/08/2015	140	454.9	217%
F1C528	11/04/2015	29/08/2015	140	451.1	215%
F2C107	14/04/2015	21/04/2015	7	163.00	78%
F2C214	14/04/2015	28/04/2015	14	232.00	110%
F2C328	14/04/2015	29/08/2015	137	393.70	187%
F3C107	18/04/2015	27/04/2015	9	115.00	55%
F3C2214	18/04/2015	05/05/2015	17	163.00	78%
F3C328	18/04/2015	29/08/2015	133	303.00	144%
F4C107	23/04/2015	29/08/2015	128	366	174%
F4C114	23/04/2015	29/08/2015	128	364.3	173%

8.3. RESISTENCIA ULTIMA POR FRICCIÓN CALCULADA DE LOS MICROPILOTES

En la tabla 12 se presenta el resumen de los parámetros utilizados para determinar la carga última teórica por fricción de los micropilotes lisos y roscados, establecidos según en el capítulo 6.

Tabla 12. Parámetros utilizados en el cálculo de la capacidad ultima de carga por fricción.

	Diámetro (m)	Longitud efectiva (m)	Área de contacto (m ²)	Cu Prom. (KN/m ²)	L/d	α	Qs (KN)	Qs (Kgf)
Micropilote Liso	0.0762	0.8	0.192	43.15	0.09525	0.93	7.69	783.66
Micropilote Roscado	0.0762 y 0.0622	0.8	0.266	43.15	0.09525	0.93	10.66	1086.54

Fuente: Autor.

Se obtiene como resultado que la carga ultima por fricción de los micropilotes lisos es de 783.66 Kgf. De la misma manera la carga última por fricción de los micropilotes roscados es de 1086.54 Kgf. Estos valores indican que los micropilotes roscados tienen un 27.88 % más de capacidad carga con respecto a los micropilotes lisos. De acuerdo a esto se comprueba de manera teórica la hipótesis que plantea que los micropilotes roscados pueden tener una mayor capacidad de carga por fricción en comparación con micropilotes lisos.

8.4. ANÁLISIS DE LA FALLA ESTRUCTURAL DE LOS MICROPILOTES:

Con base en el análisis de la patología estructural observada, se estableció tentativamente que la falla estructural de los micropilotes fue consecuencia del sentido utilizado en la espiral de refuerzo, ya que tuvo la misma dirección en la cual se introdujeron los elementos en el terreno. Esta condición se consideró errónea para resistir las solicitaciones aplicadas, ya que la espiral tiende a desarmarse y abrirse estallando el concreto que confina el refuerzo. Inicialmente es una circunstancia algo confusa y difícil de analizar con palabras, pero si se utiliza el resorte de un esfero, por ejemplo, se puede modelar la situación planteada y evidenciar de esta manera el comportamiento descrito. Adicionalmente se revisaron los resultados obtenidos en las pruebas de compresión, realizadas a los cilindros de concreto, con el fin de descartar si hubo algún problema con el material. Sin embargo las resistencias obtenidas superaban los valores esperados. Por esta razón se decidió no intentar ingresar los micropilotes restantes.

Figura 59. Estado del terreno en la instalación de los primeros micropilotes fabricados.



Fuente: Autor.

Adicionalmente, al momento de instalar estos primeros micropilotes, el suelo presentaba muy poca humedad y consistencia muy firme, como se observa en la figura 59. Por esta razón fue muy complicado que el suelo se reacomodara y expandiera, impidiendo que el micropilote ingresara fácilmente. Esto en teoría genera una mayor fuerza de torsión para ingresar los prototipos en el terreno, induciendo aún más en una falla estructural.

Para comprobar estas hipótesis, el autor decidió construir un nuevo grupo de micropilotes utilizando una nueva espiral de refuerzo (la cual se describió previamente en el capítulo 5.3.4) y aplicando el mismo diseño en la mezcla de concreto. En la figura 60 se realiza una comparación visual de las dos espirales utilizadas, evidenciando un gran cambio entre los dos elementos. Como se puede observar en la imagen de la izquierda, el refuerzo utilizado presenta una gran separación entre las espirales. Esto hace que sea muy poco el concreto en contacto con el refuerzo utilizado, además no genera un buen confinamiento del concreto que hace parte del núcleo del micropilote. También se puede observar que el sentido de roscado entre los dos tipos de espirales es inverso. Adicionalmente la cantidad de refuerzo longitudinal es mayor en las espirales de la derecha, corrigiendo otra falencia de la primera espiral utilizada.

Figura 60. Comparación visual entre los dos tipos de espirales utilizadas como refuerzo transversal.



Fuente: Autor.

Finalizada la construcción de los nuevos micropilotes diseñados, se ingresaron en el terreno con el procedimiento descrito previamente. En esta ocasión se tuvo éxito en el proceso y no se presentaron fallas estructurales como las observadas con los prototipos anteriores.

De acuerdo a esto se formula la hipótesis de que la dirección de la espiral debe ser contraria a la dirección de instalación de los micropilotes, es decir sentido contrario a las manecillas del reloj. De esta manera la espiral tiende a cerrarse y comprime el concreto del elemento, circunstancia en la que trabaja eficientemente el material. Así mismo el acero tiende a estirarse generando esfuerzos de tensión en su material, circunstancia en la que también trabaja eficientemente.

Adicionalmente se plantea la hipótesis de que la resistencia utilizada en el concreto, aunque haya satisfecho el diseño establecido, no es suficiente para soportar los esfuerzos de tensión y torsión generados a lo largo del cuerpo de los micropilotes.

8.5. ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE CARGA

Con base a los datos obtenidos en las pruebas de carga y desplazamiento, se realizaron 2 graficas por cada ensayo. Una gráfica relaciona la carga versus el desplazamiento de cada micropilote, y otra relaciona el desplazamiento versus el tiempo de ejecución de la prueba. En los anexos _____ se puede observar el registro de datos de carga y desplazamiento de cada una de las pruebas en intervalos de tiempo a cada segundo. Así mismo en los anexos audiovisuales se encuentran los videos de cada una de las pruebas, de las cuales fueron extraídos dichos datos.

A continuación se muestran los resultados generales de las pruebas a cada micropilote. Luego se presenta una relación y comparación en conjunto de todas las pruebas.

8.5.1. MICROPILOTE ROSCADO N° 1:

➤ Características del micropilote:

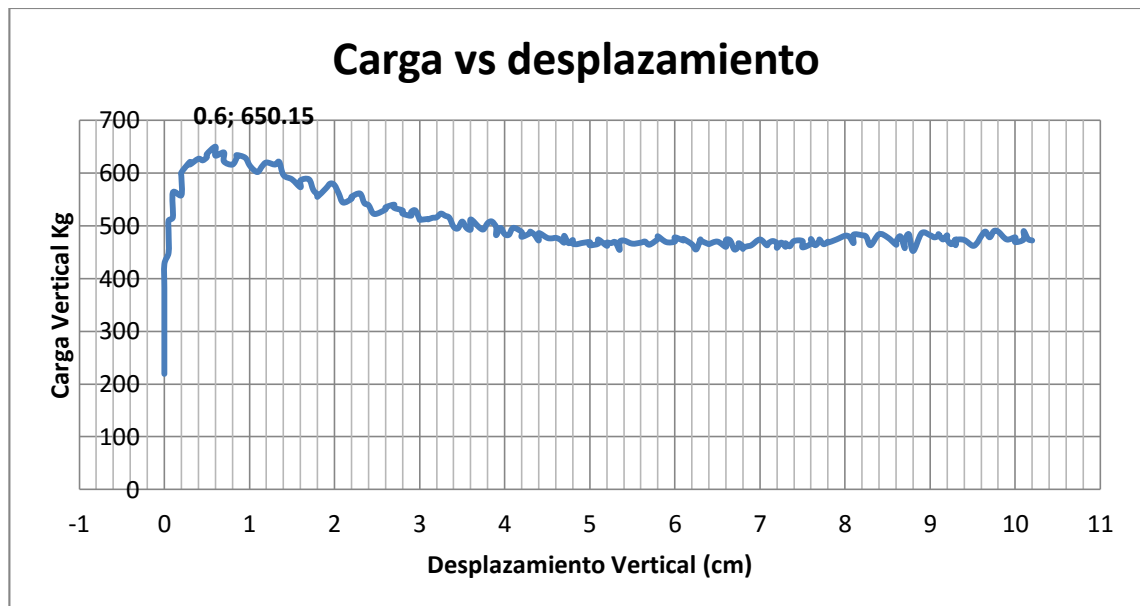
Longitud efectiva: 0.81 metros

Diámetro: 7.72 centímetros.

Carga máxima soportada: 650.15 Kilogramos.

Desplazamiento ocurrido en la carga máxima: 0.6 cm

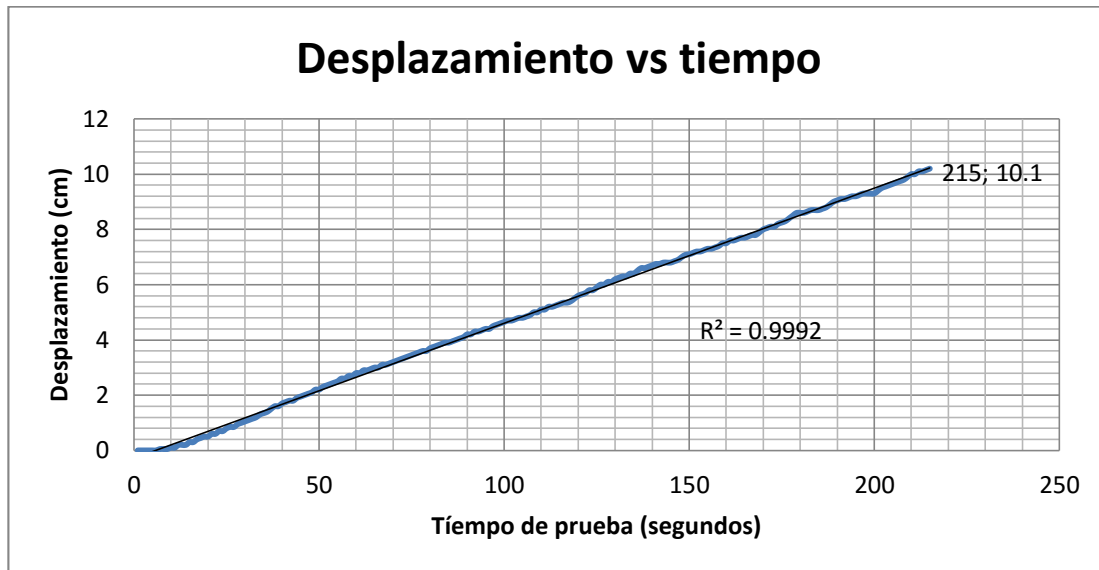
Gráfica 1. Curva carga vs desplazamiento Pilote roscado N°1



Fuente: Autor

- Tiempo máximo de la prueba: El pilote tardó 215 segundos para alcanzar un desplazamiento de 10.1 centímetros. Se observa un comportamiento directamente proporcional y lineal entre el desplazamiento vertical y el tiempo de ejecución de la prueba.

Gráfica 2. Curva desplazamiento vs tiempo micropilote roscado N°1



Fuente: autor

8.5.2. MICROPILOTE ROSCADO N° 2:

➤ Características del micropilote:

Longitud efectiva: 0.78 metros

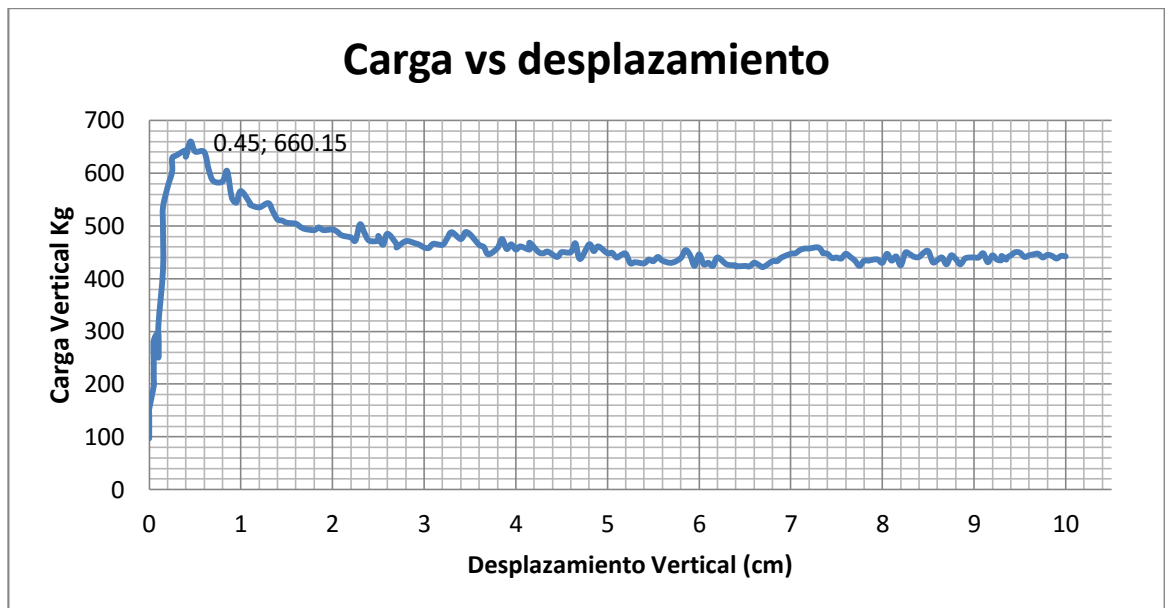
Diámetro: 7.89 centímetros.

Carga máxima soportada: 660.15 Kilogramos.

Desplazamiento ocurrido en la carga máxima: 0.45 cm

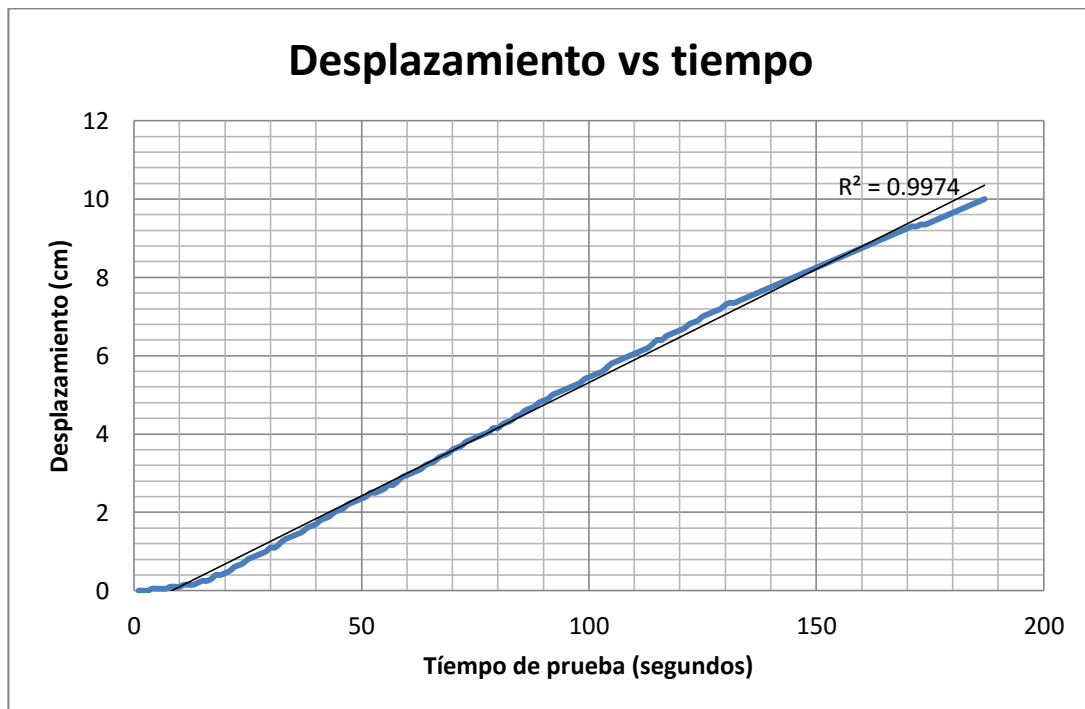
➤ Tiempo máximo de la prueba: El pilote tardó 187 segundos para alcanzar un desplazamiento de 10 centímetros. Se observa un comportamiento directamente proporcional y lineal entre el desplazamiento vertical y el tiempo de ejecución de la prueba.

Gráfica 3. Curva carga vs desplazamiento micropilote roscado N°2



Fuente: Autor.

Gráfica 4. Curva desplazamiento vs tiempo micropilote roscado N°2



Fuente: Autor.

8.5.3. MICROPILOTE ROSCADO N° 3:

➤ Características del micropilote:

Longitud efectiva: 0.76 metros

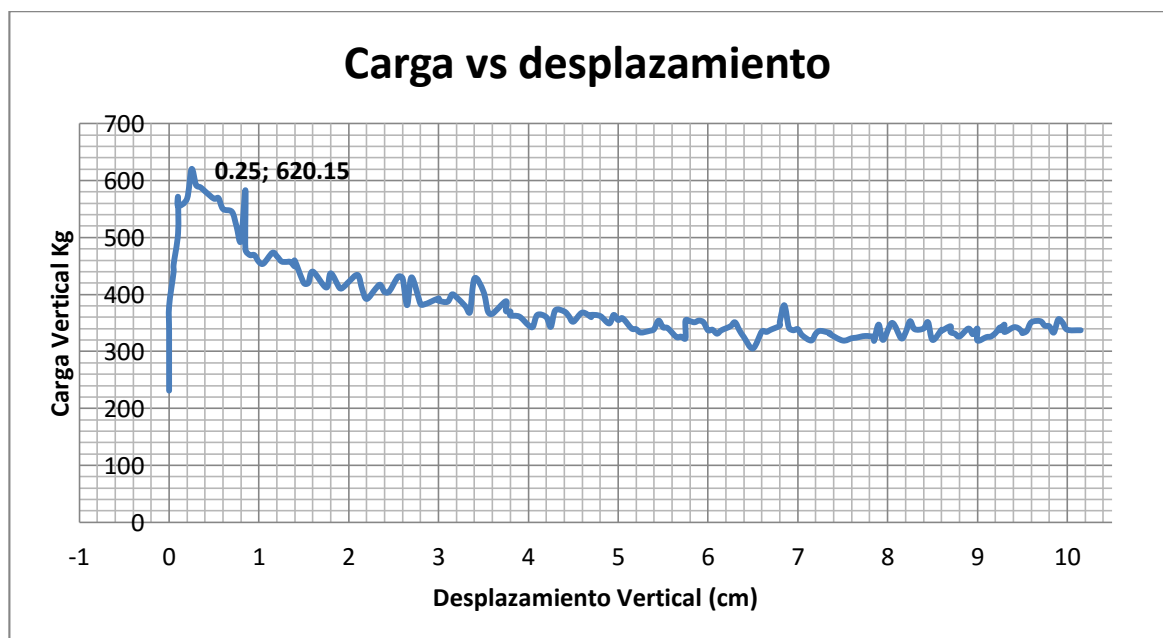
Diámetro: 8.05 centímetros.

Carga máxima soportada: 620.15 Kilogramos.

Desplazamiento ocurrido en la carga máxima: 0.25 cm.

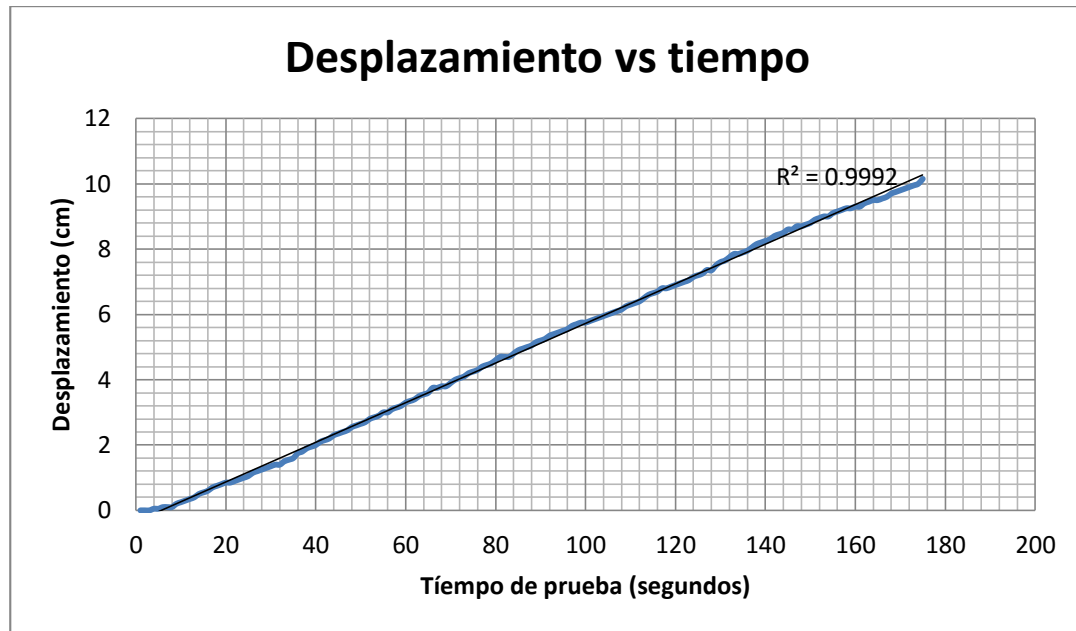
➤ Tiempo máximo de la prueba: El pilote tardó 175 segundos para alcanzar un desplazamiento de 10 centímetros. Se observa un comportamiento directamente proporcional y lineal entre el desplazamiento vertical y el tiempo de ejecución de la prueba.

Gráfica 5. Curva carga vs desplazamiento micropilote roscado N°3



Fuente: Autor.

Gráfica 6. Curva desplazamiento vs tiempo micropilote roscado N°3



Fuente: Autor.

8.5.4. MICROPILOTE LISO N° 1:

➤ Características del micropilote:

Longitud efectiva: 0.83 metros

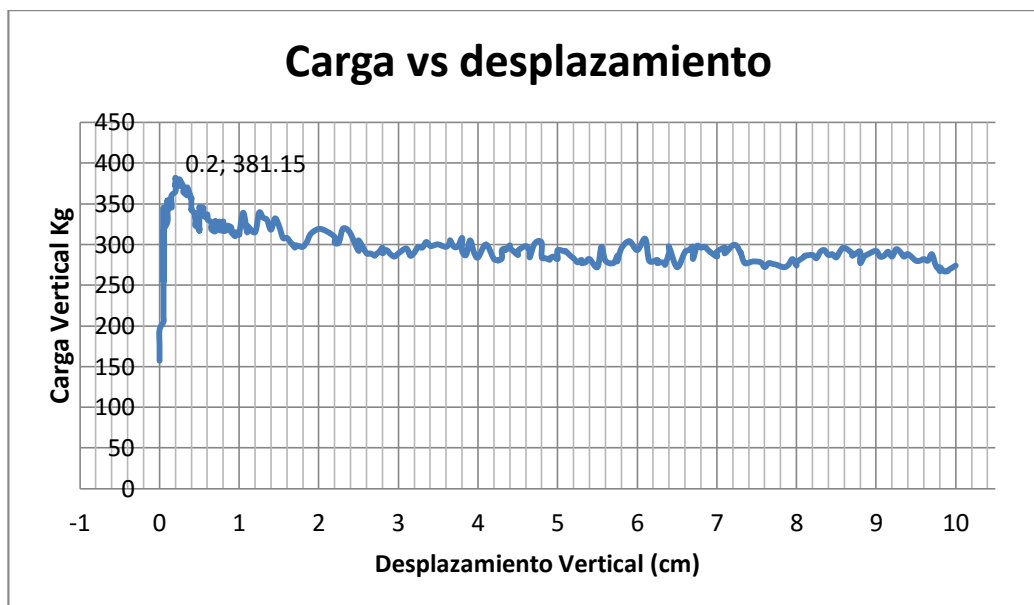
Diámetro: 7.56 centímetros.

Carga máxima soportada: 381.15 Kilogramos.

Desplazamiento ocurrido en la carga máxima: 0.2 cm.

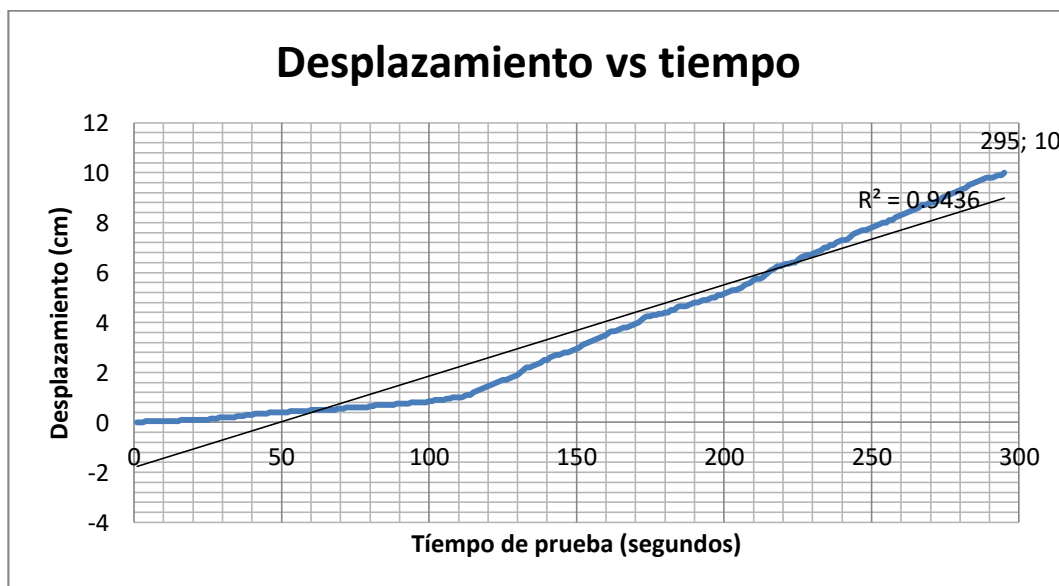
➤ Tiempo máximo de la prueba: El pilote tardó 295 segundos para alcanzar un desplazamiento de 10 centímetros. Se observa un comportamiento directamente proporcional entre el desplazamiento vertical y el tiempo de ejecución de la prueba. La tendencia lineal no es tan marcada como en los demás micropilotes.

Gráfica 7. Curva carga vs deformación micropilote liso N°1



Fuente: Autor.

Gráfica 8. Curva desplazamiento vs tiempo Pilote liso N°1



Fuente: Autor.

8.5.5. MICROPILOTE LISO N° 2:

➤ Características del micropilote:

Longitud efectiva: 0.80 metros

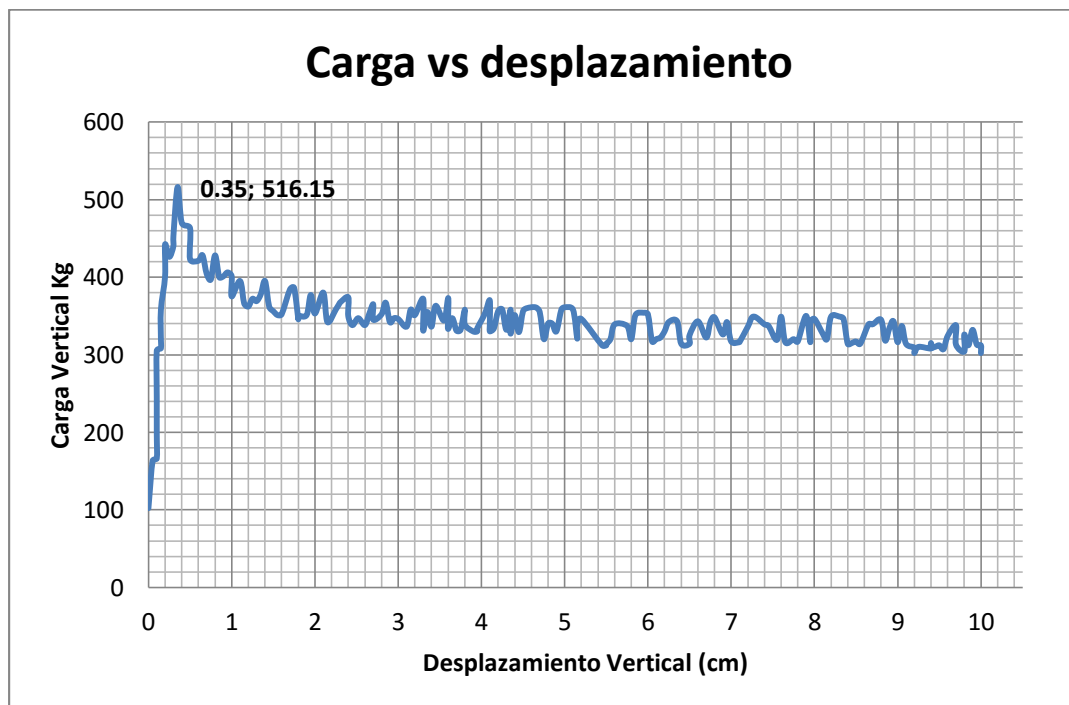
Diámetro: 7.56 centímetros.

Carga máxima soportada: 516.15 Kilogramos.

Desplazamiento ocurrido en la carga máxima: 0.35 cm.

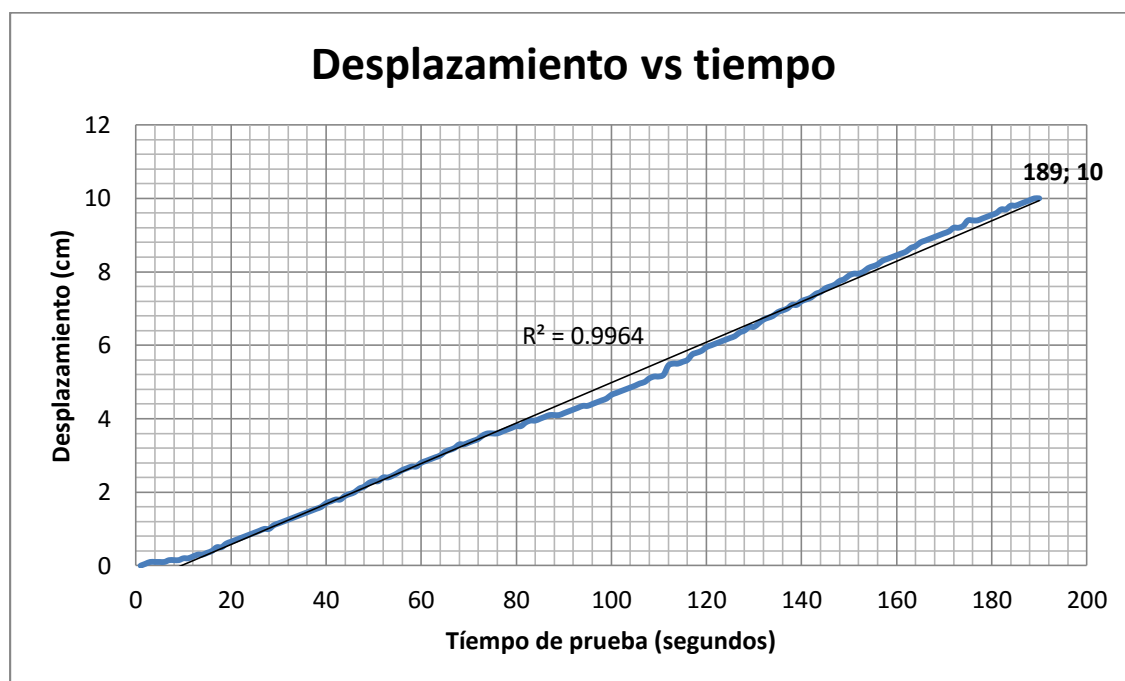
➤ Tiempo máximo de la prueba: El pilote tardó 189 segundos para alcanzar un desplazamiento de 10 centímetros. Se observa un comportamiento directamente proporcional y lineal entre el desplazamiento vertical y el tiempo de ejecución de la prueba.

Gráfica 9. Curva carga vs deformación micropilote liso N°2



Fuente autor

Gráfica 10. Curva desplazamiento vs tiempo Pilote liso N°2



Fuente: Autor.

8.5.6. MICROPILOTE LISO N° 3:

➤ Características del micropilote:

Longitud efectiva: 0.82 metros

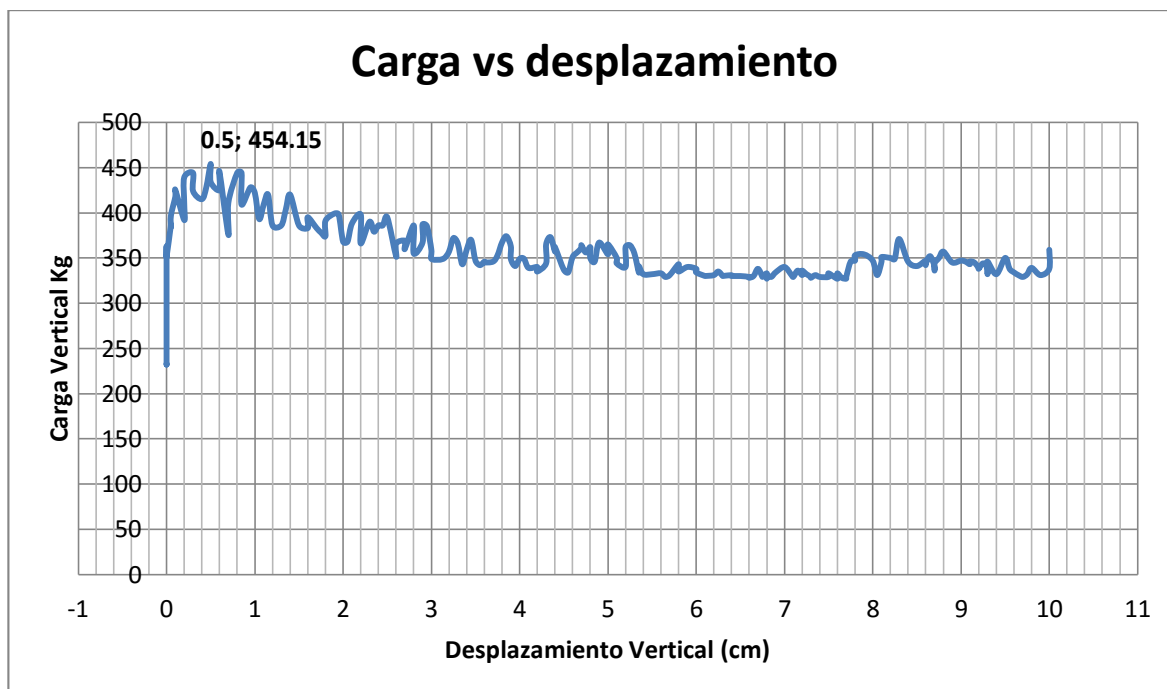
Diámetro: 7.56 centímetros.

Carga máxima soportada: 454.15 Kilogramos.

Desplazamiento ocurrido en la carga máxima: 0.5 cm.

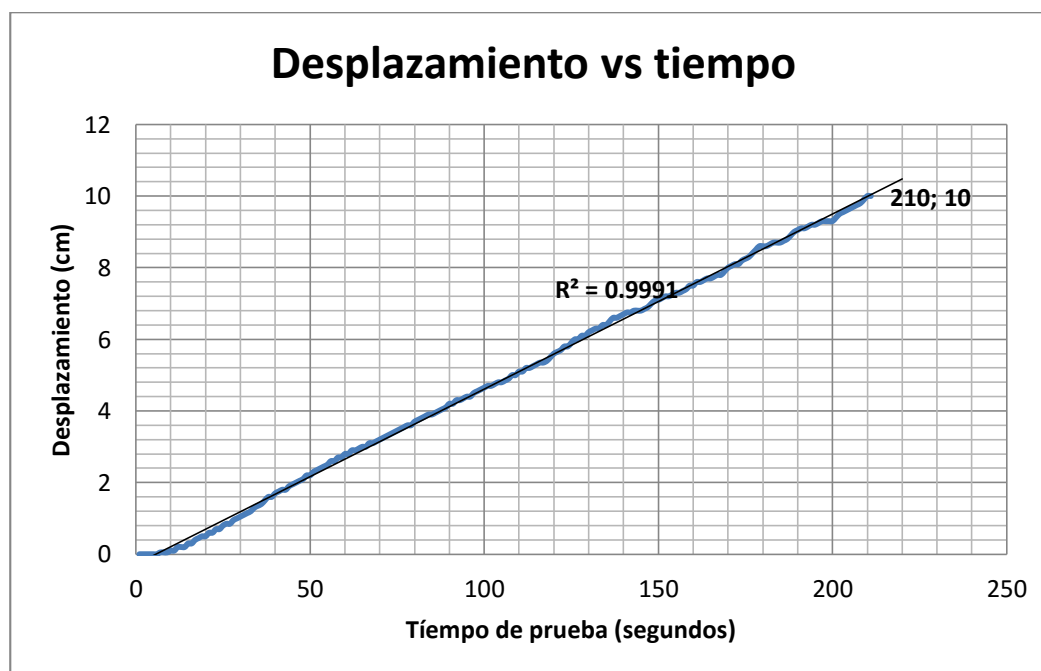
➤ Tiempo máximo de la prueba: El pilote tardó 210 segundos para alcanzar un desplazamiento de 10 centímetros. Se observa un comportamiento directamente proporcional y lineal entre el desplazamiento vertical y el tiempo de ejecución de la prueba.

Gráfica 11. Curva carga vs deformación micropilote liso N°3



Fuente: Autor.

Gráfica 12. Curva desplazamiento vs tiempo Pilote liso N°3



Fuente: Autor.

8.5.7. MICROPILOTE LISO N° 4:

➤ Características del micropilote:

Longitud efectiva: 0.74 metros

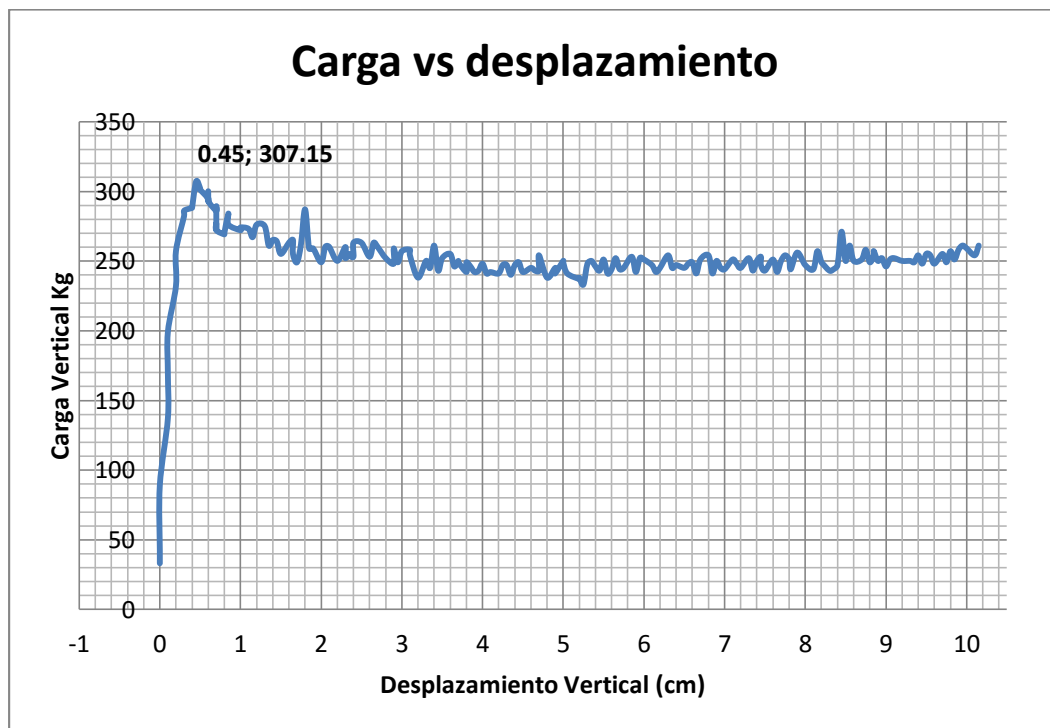
Diámetro: 7.56 centímetros.

Carga máxima soportada: 307.15 Kilogramos.

Desplazamiento ocurrido en la carga máxima: 0.45 cm.

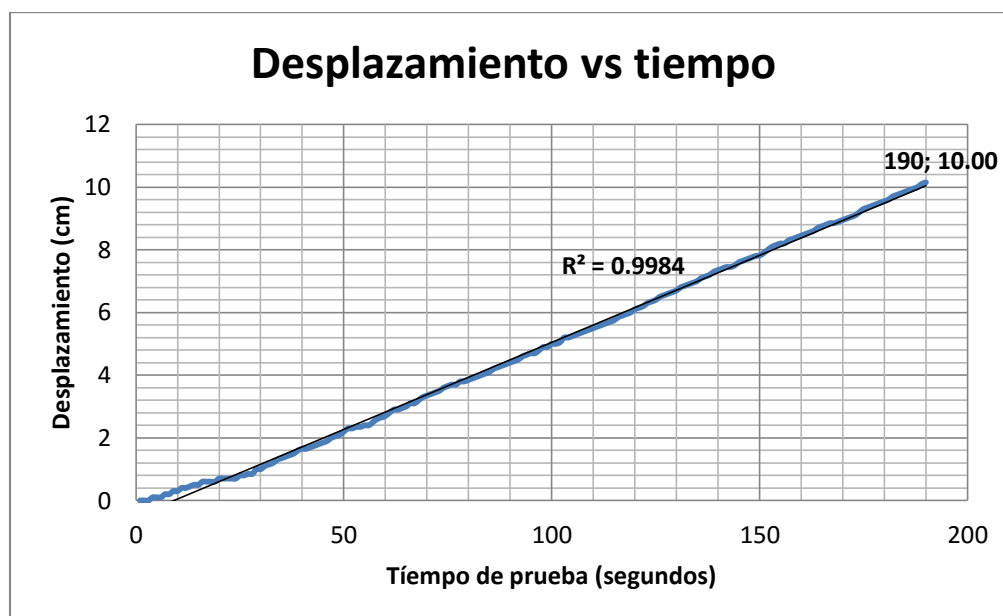
➤ Tiempo máximo de la prueba: El pilote tardó 190 segundos para alcanzar un desplazamiento de 10 centímetros. Se observa un comportamiento directamente proporcional y lineal entre el desplazamiento vertical y el tiempo de ejecución de la prueba.

Gráfica 13. Curva carga vs deformación micropilote liso N°4



Fuente: Autor.

Gráfica 14. Curva desplazamiento vs tiempo Pilote liso N°4



Fuente: Autor.

8.6. ANÁLISIS Y RELACIÓN ENTRE LAS PRUEBAS DE TODOS LOS MICROPILOTES:

En la tabla 13 se presenta un resumen de los principales datos registrados en las pruebas de carga a cada micropilote. El sobrepeso generado por las estivas de madera, el gato hidráulico y la celda de carga sobre en la cabeza de los pilotes, representan un valor neto de 32.15 Kgf. El cual se adicionó a los valores registrados en el indicador de carga de cada prueba.

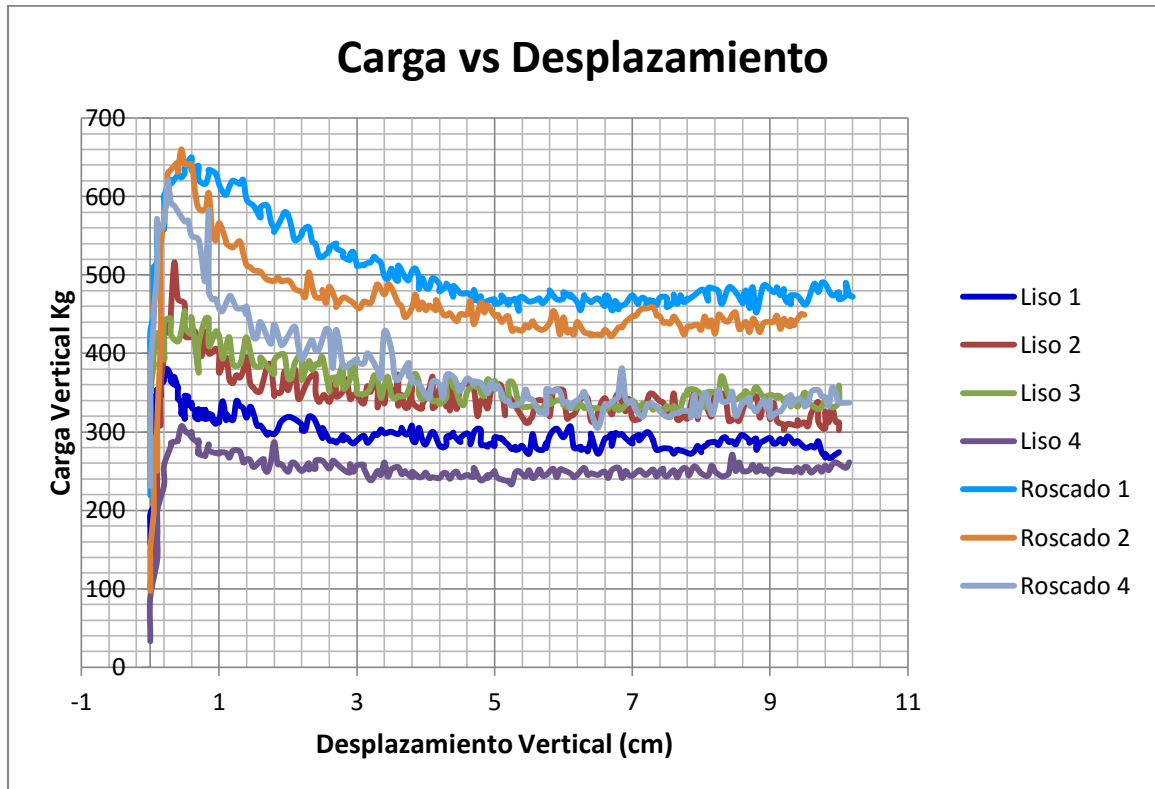
Tabla 13. Resumen de los resultados obtenidos en cada prueba de carga.

Pilote	Diámetro (cm)	Longitud efectiva (m)	Carga máxima (Kg)	Desplazamiento en la carga máxima (mm)	Duración total de la prueba (seg)
Roscado N°1	7.72	0.81	650.15	0.6	215
Roscado N°2	7.89	0.78	660.15	0.45	187
Roscado N°3	8.05	0.76	620.15	0.25	175
Liso N° 1	7.56	0.83	381.15	0.2	295
Liso N° 2	7.56	0.8	516.15	0.35	189
Liso N° 3	7.56	0.82	454.15	0.5	210
Liso N° 4	7.56	0.74	307.15	0.45	190

Fuente: Autor

Con el fin de comparar el comportamiento de todos los micropilotes ante la aplicación de las cargas verticales, la gráfica 15 involucra la curva de carga versus desplazamiento de todos los prototipos ensayados.

Gráfica 15. Curva carga vs deformación de todos los micropilotes



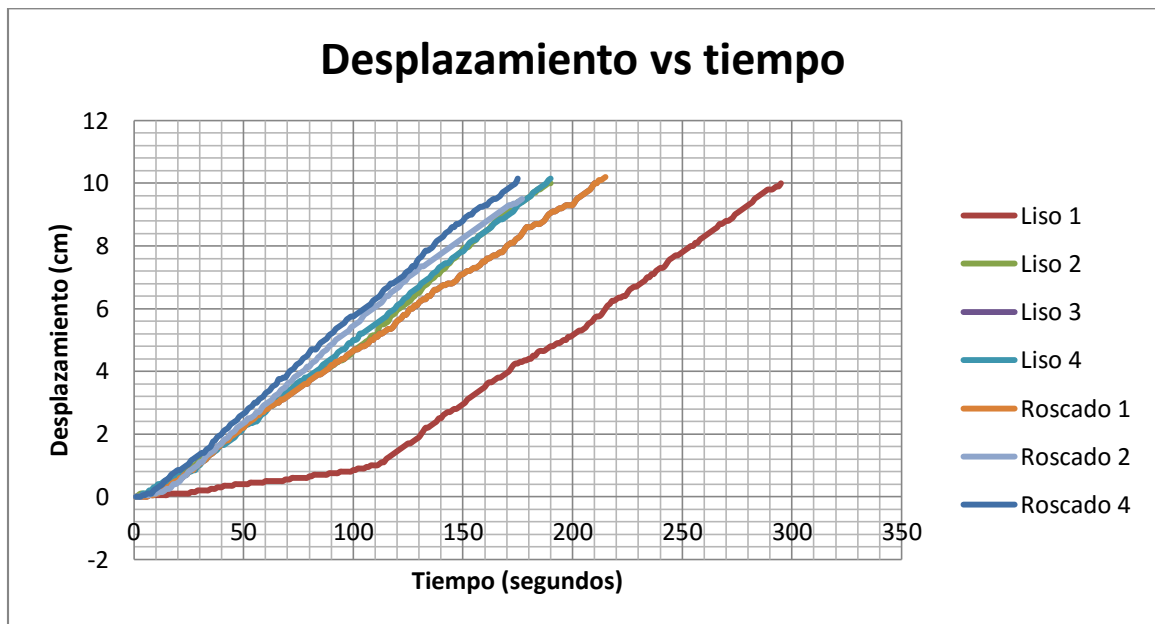
Fuente: Autor

De acuerdo a la gráfica 15, todos los micropilotes tuvieron el mismo patrón de comportamiento ante la aplicación de las cargas verticales. Inicialmente se generó un aumento lineal en la resistencia a la carga dentro de los primeros 2 a 6 milímetros de desplazamiento vertical de cada micropilote (Fase 1); hasta alcanzar un valor de carga máxima que se observa como un pico en las gráficas de carga-desplazamiento (Fase 2). En este punto la carga que resiste el micropilote comienza a decrecer mientras el desplazamiento aumenta constantemente (Fase 3), tal como se evidencia en las gráficas de desplazamiento-tiempo. Finalmente la carga se mantiene con un patrón de comportamiento relativamente constante, presentando algunas altas y bajas en los registros de carga (Fase 4).

La Fase 1 de la gráfica de carga-desplazamiento representa un comportamiento elástico del suelo en interacción con el micropilote. Por esta razón las deformaciones son mínimas con respecto al aumento de carga en el elemento. La carga máxima que se registra en cada una de las pruebas, representa el punto donde se termina el rango elástico del suelo. Es decir que el micropilote puede trabajar de una manera estable ante cargas que no superen este punto de frontera. Al superar la carga máxima, las propiedades del suelo son alteradas disminuyendo su capacidad de resistencia.

Adicionalmente se observó un comportamiento de carga residual (fase 4) en cada una de las pruebas, debido a que después de alcanzar el pico máximo de carga y luego decreciera, se mantuvo en un valor estable a medida que aumentaban las deformaciones.

Gráfica 16. Curva desplazamiento vs tiempo todos los micropilotes.



Fuente: Autor

De acuerdo a los resultados obtenidos, los micropilotes roscados presentaron una mayor capacidad de carga ante las cargas verticales aplicadas sobre estos. En comparación con los micropilotes lisos, resistieron un 35,56% más carga según los valores promedio de cada tipo de micropilote. Así mismo se observa que los valores de carga máxima resistidos por los micropilotes roscados

presentan una desviación estándar de 20,82. Este valor es menor que la desviación estándar (90,44) presentada en los valores de carga máxima en los micropilotes lisos. Esta situación demuestra una mayor eficiencia y confiabilidad en el comportamiento de los micropilotes roscados, por presentar una mayor homogeneidad en su capacidad de carga.

Todos los valores de carga máxima obtenidos en las pruebas fueron inferiores a los valores obtenidos del cálculo teórico. En la tabla se presenta un cuadro resumen de las cargas teóricas y reales promedio. Así mismo se muestra el porcentaje de diferencia entre la carga que soportan los micropilotes roscados en comparación con los micropilotes lisos.

Tabla 14. Cargas últimas por fricción teóricas y reales promedio de los micropilotes lisos y roscados

	Carga última teórica Kgf	Carga última real promedio Kgf
Micropilote Liso	783.66	414.65
Micropilote Rosado	1086.54	643.48
% de diferencia de carga entre roscado y liso	27.88%	35.56%

Fuente: Autor.

Aunque los valores obtenidos en las pruebas de carga fueron menores que los obtenidos en el cálculo teórico, estos se aproximan bastante y se encuentran dentro un rango lógico y proporcional. El hecho de que los valores sean cercanos, indican que el procedimiento realizado en campo fue exitoso. Esto se afirma ya que los parámetros teóricos utilizados como referencia tienden a ser generales dentro del punto de vista de los suelos. En el ámbito académico, es difícil o casi imposible encontrar funciones y ecuaciones que modelen todas las características de un suelo, el porcentaje de humedad, su composición física, el tipo de instalación de los pilotes, el material de la cimentación, etc. Y teniendo en cuenta que la función utilizada solo involucra la cohesión del suelo y las dimensiones del micropilote, los resultados son satisfactorios.

Otra característica que se observa en los resultados obtenidos, es que la proporción real de carga adicional que tienen los micropilotes roscados sobre los lisos (35.56%), es muy cercana a la proporción teórica (27.88%); solo hay una diferencia del 7.69%. Ya que la única variable que cambia en el cálculo de carga última por fricción, es el área de contacto efectiva para los dos tipos de micropilotes, se puede afirmar que el aumento de la capacidad de carga real obtenida en los prototipos roscados se debe una mayor área de contacto.

9. CONCLUSIONES

- De acuerdo al proceso de búsqueda de información relacionada con el tema, se estableció que este es un tema de investigación reciente y que se encuentra en desarrollo en países de Europa o Asia. Así mismo el desarrollo investigativo del tema en nuestro país es mínimo. Además la poca información encontrada sobre este tipo de cimentación es muy poca y de acceso limitado.
- Las diferentes investigaciones y antecedentes teóricos analizados en el estado del arte, dan un aval sobre los objetivos y expectativas planteadas al comienzo de la investigación. La relación entre esta información y los resultados obtenidos en el proyecto, demuestran que este va dirigido por buen camino.
- La instalación de este tipo de micropilotes genera altos esfuerzos de torsión sobre su estructura, debido a la resistencia que hace el suelo ante el fuste del micropilote cuando este se está roscando en el terreno.
- El diámetro del prehuco excavado para la instalación de los micropilotes influye directamente en la fuerza de torsión necesaria para ingresarlos al terreno. Evidenciando un comportamiento inversamente proporcional entre el diámetro excavado y la fuerza de rotación. Realizar un prehuco genera mayor inversión económica y tiempo en el sistema constructivo planteado, sin embargo para esta investigación fue necesario realizarlos. Se recomienda para futuros investigadores realizar pruebas que involucren instalar los micropilotes con diferentes diámetros de prehucos, y sin realizar prehucos; y consecutivamente medir la torsión necesaria en cada caso para ingresar los elementos. Adicionalmente se recomienda analizar la capacidad de carga última por fricción en cada caso.
- El diseño estructural de este tipo de micropilotes es complejo y de un grado de dificultad mayor que otros elementos, ya que el comportamiento de los esfuerzos de torsión que se generan en su estructura varían considerablemente a medida que el elemento entra en el terreno.
- A los segundos micropilotes roscados contruidos por el autor solo se les modificó el refuerzo transversal y longitudinal, y estos no presentaron fallas estructurales como en los primeros prototipos. De acuerdo a esto se establece

que la espiral de refuerzo debe ser construida con sentido contrario a la dirección del roscado de los micropilotes en el terreno. De esta manera se garantiza que el concreto y el acero funcionen correctamente. En el caso de esta investigación, las espirales deben ir con sentido contrario a las manecillas del reloj. Esto se debe a que cuando la espiral de refuerzo se encuentra en sentido contrario al de la instalación del elemento, esta se cierra y comprime el concreto del núcleo del prototipo. De lo contrario la espiral se abre y puede estallar el concreto. Así mismo el refuerzo longitudinal es de vital importancia en la construcción de estos elementos.

- Aunque los resultados de las pruebas de compresión a los cilindros de concreto indicaron que el material superó la resistencia de diseño, es probable que 21 MPa no sea suficiente para resistir los esfuerzos de torsión inducidos sobre la estructura de los micropilotes. Esta razón pudo influir en la falla estructural de los prototipos. Se recomienda hacer un análisis para determinar una resistencia adecuada.
- Se recomienda medir la torsión generada al momento de ingresar los micropilotes en un terreno.
- Los micropilotes roscados analizados en esta investigación tuvieron un 35,56% de aumento promedio en la capacidad de carga por fricción en comparación con los micropilotes lisos. Este aumento en la carga se le atribuye al área efectiva que tienen estos micropilotes, ya que fue la única variable medible y comparable que cambió entre los dos tipos de elementos.
- La carga máxima promedio soportada por los micropilotes roscados fue de 643.48 Kgf. Además los resultados de carga máxima obtenidos por medio de las pruebas en campo, se acercan bastante a los valores obtenidos en el cálculo teórico del método alfa. Esto demuestra que el comportamiento experimentado por los micropilotes fue satisfactorio y se ajusta a la teoría, validando la hipótesis planteada inicialmente en la investigación. Adicionalmente la proporción teórica de aumento de carga (27.88%) entre micropilotes lisos y roscados, es muy cercana a la proporción real de aumento de carga promedio (35.56%). Esta circunstancia también demuestra que los prototipos se comportaron dentro de los rangos teóricos.

- El aumento del área de contacto de los micropilotes roscados se debe a las roscas sobre el fuste de estos elementos. Esto aumenta la fricción superficial con el suelo y así mismo su capacidad de carga última.
- Se recomienda a futuros investigadores que el punto fijo utilizado para medir los desplazamientos verticales de los micropilotes, esté retirado de los elementos a una distancia por fuera del radio de influencia de las deformaciones.
- Se recomienda al realizar las pruebas de carga-desplazamiento, llegar antes del límite de carga máxima y descargar. De esta manera graficar en función de los asentamientos totales y netos. Para realizar esto es necesario utilizar un sistema carga continua creciente y decreciente.
- Con base en la información estudiada en el estado del arte y con los resultados obtenidos, se propone investigar los micropilotes propuestos como elementos de recalce a cimentaciones existentes, sistema de anclaje en taludes y elementos de redensificación de suelos.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHOI, Yongkyu; KIM, Dong-Chol, KIM, Sung-Soo, NAM, Moon S y KIM Tae-Hyung. Implementation of noise-free and vibration-free PCH screw piles on the basis of full-scale tests. En: Journal of Construction Engineering and Management. 2013. Vol. 139, no. 8, p. 960-967.
- MANGUSHEV, R.; KONYUSHKOV, V. y D'YAKONOV, I. Analysis of Practical Application of Screw-in Cast Piles. En: Soil Mechanics & Foundation Engineering. Noviembre, 2014. vol. 51, no. 5, p. 227-233.
- PRASAD, Y. y RAO, S. Lateral Capacity of Helical Piles in Clays. En: Journal of Geotechnical Engineering. Noviembre, 1996. vol. 122, no.11, p. 938–941.
- LI, Xin y LIANG, Li. Experimental and numerical study on torsional behavior of precast concrete screw pile body. En: Septiembre, 2012. vol. 188, p. 137-143.
- LI, Xiu Hua; CONG, Wei Min; YUE, Chen Xi y CHEN, Ya Dong. Analysis the bearing force characteristic of the new cast-in-place concrete pile with half-screwed. En: Progress in Industrial and Civil Engineering II. Julio, 2013. vol. 405-408, p. 841-844 .
- LI, Xiu Hua; GAO, Yan; YUE, Chen Xi y WANG, Chen Wu. Construction Technology of the New Cast-in-Place Concrete Pile with Half-Screwed. En: Advances in Civil and Industrial Engineering. Mayo, 2013. vol. 353-354, p. 2847-2850.
- LIU, Jian Xiong; GAO, Yan y LI, Xiu Hua. Prediction of ultimate bearing capacity of half-screwed pile by integrated exponential function model. En: Advances in Civil and Industrial Engineering. Mayo, 2013. vol. 353-357, p. 881-885.
- LI, Cheng-Wei; CHEN, Jin-Jian; WU, Qiong; XIA, Xiao-He y WANG, Jian-Hua. Bearing mechanism and calculation method of screw pile. En: Shanghai Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Shanghai Jiaotong University. Junio, 2010. Vol. 44, no. 6, p. 726-730.

- WANG, Bin; QIAN, Jian-Gu; CHEN, Hong-Wei; HUANG, Mao-Song y Hu, Yu-Yin. Numerical analysis of grouting-screw pile uplift bearing capacity. En: Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics. Octubre, 2014. vol. 35, p. 572-578.
- WU, Qi Hong; WU, Qing y WAN, Shi Ming. Contrast Analysis about the Result of Static Load Test and High Strain Testing for the Bearing Capacity of Screw Pile Foundation. En: Advances in Civil Structures IV. Mayo, 2014. vol. 578-579, p. 663-666.
- DONG, Tian-Wen; LIANG, Li; HUANG, Lian; YANG, Chong y WANG, Ming. Experimental research on bearing characters of screw pile group. En: Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics. Abril, 2008. vol. 29, no. 4, p. 893-896.
- DONG, Tian-Wen y LIANG, Li. Solution of load-settlement function of single screw pile under axial pressure. En: Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering. Octubre, 2007. vol. 29, no. 10, p. 1483-1487.
- LI, Zhiyi; LIU, Zhong; ZHAO, Yanfei y ZHANG, Huidong. Field test study of new-type soil displacement screw pile. En: Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. Febrero, 2011. vol. 30, no. 2, p. 411-417.
- QUIAN, Jiangu; CHEN, Hongwei; JIA, Peng; HUANG, Maosong y Hu, Yuyin. Experimental study of mechanical behaviours of grouting-screw pile interface. En: Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. Septiembre, 2013. vol. 32, no. 9, p. 1744-1749.
- LUTENEGGER, Alan J; KEMPER, James H. Preservation of historic structures using Screw-Pile foundations. En: Structural Analysis of Historic Construction: Preserving Safety and Significance - Proceedings of the 6th International Conference on Structural Analysis of Historic Construction. Julio, 2008. vol. 2, p. 1079-1086.
- LIU, Zhong; Lu, Jing Chun; ZHANG, Yi; LI, Zhi-Yi y JIA, Yudong. Model test study of load deformation behavior of soil displacement screw pile in sand. En: Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. Marzo, 2011. vol. 30, no. 3, p. 616-624.

- YAO, Jian-Ming; MENG, Zhen; CHEN, Jin-Jian y WANG, Jian-Hua. Application of drilled screw piles in Shanghai soft soils. En: Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering. Octubre, 2013. vol. 35, no. SUPPL. 2, p. 1058-1061.
- MENG, Zhen; CHEN, Jin-Jian y WANG, Jian-Hua y YIN, Zhen-Yu. Study of model test on bearing capacity of screw piles in sand. En: Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics. Septiembre, 2012. vol. 33, no. SUPPL. 1, p. 141-145.
- LIU, Zhong; YANG, Song; Lu, Jing Chun y LI, Zhi-Yi. Full scale field load tests on bearing capacity of SDS pile and CFA pile. En: Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering. Agosto, 2010. vol. 32, no. SUPPL. 2, p. 127-131.
- DE COCK, F. Y IMBO, R. Atlas screw pile: a vibration-free, full displacement, cast-in-place pile. En: Transportation Research Board. 1994. p. 49-62.
- FLEMING, Ken; WELTMAN, Austin; RANDOLPH, Mark y ELSON, Keith. Piling Engineering. 3 ed. Abingdon: Taylor & Francis, 2009. 407 p. ISBN 0-203-93764-3
- FLEMING, Ken; WELTMAN, Austin; RANDOLPH, Mark y ELSON, Keith. Introduction. En: Piling Engineering. 3 ed. Abingdon: Taylor & Francis, 2009. 1-6 p.
- TOMLINSON, Michael y WOODWARD, John. Pile Design and Construction Practice. 6 ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2014. 608 p. ISBN 1466592648.
- TOMLINSON, Michael y WOODWARD, John. General principles and practices. En: Pile Design and Construction Practice. 6 ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2014. p. 1.
- PRAKASH, Shamsheer y SHARMA Hari D. Pile Foundations in Engineering Practice. 1 ed. Canadá: John Wiley & Sons, Inc. 1990. 735 p. ISBN 0-471-61653-2
- PRAKASH, Shamsheer y SHARMA Hari D. Introduction. En: Pile Foundations in Engineering Practice. 1 ed. Canadá: John Wiley & Sons, Inc. 1990. p 1.

- AGUDELO, Adriana y CASTRO, Martín A. Estudio de vulnerabilidad sísmica de la ciudad de Tunja. Tesis de grado. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). 1999.
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE BOYACÁ; UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA. Investigación de las aguas subterráneas en marco de la implementación parcial de los planes de manejo y protección de los acuíferos de Tunja y Duitama, formulación del manejo ambiental de las aguas subterráneas-termo minerales de Paipa. Tunja, Boyacá. 2012

11. APÉNDICES Y ANEXOS

Se anexan de manera digital en Cd, las fotografías de todos los procesos realizados en la investigación. Así mismo se anexan los formatos de hojas de cálculo utilizadas para los análisis de datos y procesamiento de información.