

ALTERNATIVA DE CIMENTACIÓN Y MEJORA DE TERRENOS MEDIANTE SISTEMAS
DE MICROPILOTES PARA OBRAS DE CONTENCIÓN.



CRISTIAN CAMILO BELTRÁN BERMÚDEZ



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2024

ALTERNATIVA DE CIMENTACIÓN Y MEJORA DE TERRENOS MEDIANTE SISTEMAS
DE MICROPILOTES PARA OBRAS DE CONTENCIÓN.

CRISTIAN CAMILO BELTRÁN BERMÚDEZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Asesor

Ing. JUAN MANUEL DÍAZ SALGADO, MSc.

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2024

Autoridades Académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O. P.

Rector General

P. Eduardo GONZÁLEZ GIL, O. P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O. P.

Rector Seccional Villavicencio

P. Rodrigo GARCÍA JARA, O. P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

Ing. LUIS FERNANDO DÍAZ CRUZ

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi padre, un faro de sabiduría y fortaleza en mi vida. Su inquebrantable apoyo y consejos han sido el cimiento de mi camino académico. A mi esposa e hijos, quienes han comprendido las exigencias de mis estudios y han sido mi mayor motivación. A mis amigos de toda la vida, por su amistad incondicional y por ser testigos de mis logros y desafíos. A mis mentores y colegas, cuya guía y colaboración han sido fundamentales en este trayecto. Agradezco a todos aquellos que, de alguna manera, han sido parte de este proyecto y han contribuido a su realización. Este logro es un testimonio no solo de mi esfuerzo, sino también de la red de apoyo que ha sido parte integral de mi jornada académica y personal.

Agradecimientos

Agradezco sinceramente a el ingeniero Juan Manuel Salgado Díaz, por su guía experta y apoyo constante a lo largo de este proyecto. Su dedicación y conocimientos fueron fundamentales para el éxito de esta investigación.

Quiero expresar mi gratitud a todo el personal de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio por sus valiosas contribuciones y orientación durante esta formación académica.

Contenido

Resumen	11
Abstract.....	12
Glosario.....	13
Introducción.....	14
1. Formulación del problema.....	15
1.1. Pregunta de investigación.....	15
2. Objetivos	16
2.1. Objetivo general	16
2.2. Objetivos específicos.....	16
3. Justificación.....	17
4. Alcance.....	19
5. Estado del arte	20
6. Marco teórico	23
6.1. Fundamentos de Cimentación y Estabilidad de Obras de Contención:	23
6.2. Tipos de Cimentación y Desafíos Geotécnicos en Obras de Contención:	23
6.3. Introducción a los Micropilotes:	23
6.4. Diseño de Micropilotes en Obras de Contención:.....	23
6.5. Aplicaciones Exitosas de Micropilotes en Obras de Contención:.....	24
6.6. Beneficios Ambientales y Sostenibilidad de los Micropilotes:.....	24
6.7. Tecnologías Asociadas a los Micropilotes:.....	24
6.8. Desempeño a Largo Plazo y Mantenimiento de Micropilotes:	24
7. Desarrollo de la metodología empleada	25
7.1. Fricción negativa en micropilotes	25
7.2. Determinación del ángulo de fricción.	25
7.3. Módulo de Balasto.	26
8. Resultados	30
8.1. Diseño de micropilote	30
8.2. Diseño geotécnico	31
8.3. Diseño estructural.....	33

8.4. Cartilla informativa.	40
9. Conclusiones	44
10. Recomendaciones	45
11. Bibliografía	46

Lista de Figuras

Figura 1	<i>Ubicación geoespacial del proyecto</i>	30
Figura 2	<i>Propuesta de diseño con micropilotes de 30 cm de diámetro</i>	31
Figura 3	<i>Predimensionamiento de la zapata</i>	33
Figura 4	<i>Predimensionamiento del micropilote.....</i>	34
Figura 5	<i>Valores del coeficiente K por estrato de suelo.....</i>	36
Figura 6	<i>Dado junto con los micropilotes y la carga central.....</i>	37
Figura 7	<i>Dado carga nodal y combinaciones de carga.....</i>	38
Figura 8	<i>Momento Último.....</i>	38
Figura 9	<i>Diagrama de iteración</i>	39
Figura 10	<i>Replanteo y perforación del micropilote.....</i>	41
Figura 11	<i>Instalación de la tubería de perforación y retiro de RCD</i>	42
Figura 12	<i>Inyectado del mortero al micropilote.....</i>	43

Lista de Tablas

Tabla 1	<i>Valores K_{30} propuestos por Terzaghi</i>	27
Tabla 2	<i>Resultados de estudios de laboratorio</i>	31
Tabla 3	<i>Cálculo de la capacidad por tramos.....</i>	32
Tabla 4	<i>Capacidad total de tramos.....</i>	32
Tabla 5	<i>Valores del coeficiente K por estrato de suelo</i>	35

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1	<i>Determinación de la fricción negativa en un micropilote</i>	25
Ecuación 2	<i>Determinación del ángulo de fricción de suelos granulares</i>	26
Ecuación 3	<i>Módulo de Balasto K vertical para suelos cohesivos</i>	26
Ecuación 4	<i>Módulo de Balasto K vertical para suelos arenosos</i>	26
Ecuación 5	<i>Módulo de Balasto K horizontal para suelos cohesivos</i>	27
Ecuación 6	<i>Módulo de Balasto K horizontal para suelos cohesivos</i>	28
Ecuación 7	<i>Cálculo de la capacidad de carga por tramo</i>	28
Ecuación 8	<i>Capacidad total a fricción conjunto de micropilotes.....</i>	29
Ecuación 9	<i>Cálculo de la eficiencia.....</i>	29
Ecuación 10	<i>Carga admisible por grupo de micropilotes</i>	29

Resumen

El trabajo de grado "Alternativa de Cimentación y Mejora de Terrenos Mediante Sistemas de Micropilotes para Obras de Contención" se enfoca en proponer soluciones innovadoras para cimentación y estabilización de terrenos en proyectos de obras de contención. El estudio aborda la viabilidad, diseño y aplicación de micropilotes como alternativa eficiente y sostenible. Se examinan casos de estudio, metodologías de diseño y tecnologías asociadas, destacando la importancia de esta técnica en la mejora de la estabilidad del suelo y en la prevención de problemas geotécnicos en estructuras de contención. El trabajo contribuye al conocimiento y aplicación práctica de sistemas de micropilotes en el ámbito de la ingeniería civil y geotécnica, ofreciendo perspectivas valiosas para profesionales del sector y académicos interesados en este campo.

Palabras Clave: Cimentación, Micropilotes, Terrenos, Obras de Contención y Mejora Geotécnica.

Abstract

The thesis, entitled "Alternative Foundation and Ground Improvement through Micropile Systems for Retaining Structures," delves into inventive approaches for foundation and soil stabilization within projects that entail retaining structures. The study centers on assessing the viability, developing designs, and implementing micropiles as an effective and sustainable alternative. It scrutinizes case studies, design methodologies, and associated technologies, underscoring the significance of this technique in fortifying soil stability and averting geotechnical challenges in retaining structures. This research significantly contributes to the comprehension and pragmatic utilization of micropile systems in civil and geotechnical engineering, offering valuable insights for professionals and academics with an interest in this field.

Key Word: Foundation, Micropiles, Soil, Retaining Structures, Geotechnical Improvement

Glosario

CIMENTACIÓN: Proceso de construcción de la base de una estructura para distribuir y transmitir su carga al suelo de manera segura y estable.

MICROPILOTES: Elementos estructurales delgados y de pequeño diámetro utilizados para mejorar la capacidad portante del suelo y proporcionar estabilidad a estructuras, especialmente en proyectos de cimentación y obras de contención.

TERRENOS: Superficie o capa de la corteza terrestre que es objeto de estudio en geotecnia, considerando sus características físicas y mecánicas para propósitos de diseño y construcción.

OBRAS DE CONTENCIÓN: Estructuras diseñadas para resistir las presiones laterales del suelo, tales como muros de contención, diques, y estructuras similares, con el fin de prevenir deslizamientos o colapsos.

MEJORA GEOTÉCNICA: Conjunto de técnicas y métodos aplicados para modificar y optimizar las propiedades geotécnicas del suelo, con el objetivo de aumentar su capacidad de carga y estabilidad.

ESTABILIDAD DEL SUELO: Capacidad del terreno para resistir cambios o deformaciones, evitando colapsos, deslizamientos u otras fallas geotécnicas.

PREVENCIÓN GEOTÉCNICA: Conjunto de medidas y técnicas aplicadas para evitar o reducir los riesgos asociados con problemas geotécnicos en ingeniería civil y construcción.

Introducción

La elección adecuada de sistemas de cimentación desempeña un papel crucial en el éxito y la eficiencia de las obras de infraestructura, especialmente en proyectos de contención. En este contexto, los micropilotes han emergido como una alternativa versátil y efectiva, particularmente en suelos finos como gravas y arenas. Este estudio se propone evaluar exhaustivamente el uso de micropilotes como sistemas de cimentación en obras de infraestructura, con un enfoque especial en su aplicación en suelos finos, buscando mejorar la eficiencia en proyectos de contención.

1. Formulación del problema

El conocimiento detallado de las características físicas del terreno es esencial en la planificación y ejecución de obras de infraestructura. La elección adecuada del tipo de cimentación, ya sea superficial o profunda, depende en gran medida de la resistencia del suelo. En la práctica, los tipos de cimentación más comunes incluyen zapatas, losas, pilotes y micropilotes. Cada uno de estos tipos se utiliza en función de la capacidad portante del suelo y la profundidad del estrato resistente (Bowles, J. E., 1997).

En el ámbito de la ingeniería civil, los programas de estudio de pregrado generalmente abordan asignaturas fundamentales como concreto reforzado, concreto presforzado, análisis estructural, geotecnia y cimentación (Das, 2012). Sin embargo, es importante destacar que, a pesar de la relevancia creciente de los micropilotes en proyectos de cimentación, existe una carencia de información específica disponible en medios electrónicos y en el ámbito académico.

Dada la versatilidad y la creciente aplicación de los micropilotes en obras de ingeniería y cimentación, así como la necesidad de llenar este vacío de conocimiento, surge la oportunidad de desarrollar un trabajo de grado disciplinar destinado a la comunidad académica. Este documento se centrará en revisar el diseño, los tipos de micropilotes y las generalidades relacionadas con su uso como alternativa de cimentación en suelos finos, como gravas y arenas (Tomlinson & M. J., 2007).

Este enfoque permitirá abordar de manera más específica la importancia de los micropilotes en la Ingeniería Civil y proporcionar información detallada sobre su diseño y aplicación en suelos particulares, contribuyendo así a llenar un vacío de conocimiento en el ámbito académico.

1.1. Pregunta de investigación

¿Cómo superar la falta de información sobre micropilotes en su aplicación en suelos finos, dada su creciente importancia en proyectos de cimentación y la necesidad urgente de cubrir este vacío de conocimiento en el ámbito académico y en medios electrónicos?

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar el uso de micropilotes como sistemas de cimentación en obras de infraestructura, con énfasis en su aplicación en suelos finos como gravas y arenas, para mejorar la eficiencia de obras de contención.

2.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión detallada de la literatura científica y técnica sobre micropilotes, centrándose en su diseño, principios de funcionamiento y aplicaciones en proyectos de ingeniería civil.
- Evaluar la eficacia de los micropilotes como alternativa de cimentación en suelos finos, considerando factores como capacidad portante, carga admisible y resistencia a la deformación.
- Comparar y contrastar los diferentes tipos y métodos de construcción de micropilotes, identificando las mejores prácticas y recomendaciones para su implementación en obras de contención y otros proyectos de infraestructura.

.

3. Justificación

La cimentación de obras de infraestructura, especialmente aquellas que involucran estructuras de contención, es un elemento crítico para garantizar su estabilidad y rendimiento a largo plazo (Tomlinson & M. J., 2007). Elegir el tipo correcto de cimentación es fundamental para garantizar la seguridad y eficiencia de la construcción en estos proyectos. En este contexto, los micropilotes han surgido como una alternativa de cimentación versátil y eficaz que merece una extensa investigación y documentación.

Los micropilotes son elementos de cimentación de pequeño diámetro que se instalan mediante la perforación de orificios y la posterior inyección de lechada de cemento o mortero. Su capacidad para adaptarse a una variedad de condiciones geotécnicas y aplicaciones estructurales los convierte en una opción atractiva para proyectos de cimentaciones.

La necesidad de explorar los micropilotes como sistemas de cimentación se basa en varios factores. En primer lugar, la información específica sobre el diseño, la tipología y las aplicaciones de micropilotes, especialmente en suelos finos como gravas y arenas, es limitada en la literatura existente (Bowles, J. E., 1997). A pesar de su creciente popularidad, los programas académicos de pregrado suelen ofrecer un enfoque limitado en esta área.

Además, la selección adecuada de la cimentación es fundamental para la optimización de recursos en proyectos de infraestructura (Das, 2012). Los micropilotes pueden ofrecer ventajas en términos de costos, tiempos de construcción y eficiencia estructural si se aplican de manera adecuada.

En un contexto de creciente conciencia ambiental y sostenibilidad, la elección de sistemas de cimentación que minimicen el impacto ambiental es esencial. Los micropilotes pueden ser una opción más sostenible en comparación con métodos tradicionales de cimentación (Terzaghi, 2008).

Dada la importancia de abordar esta brecha de conocimiento y considerando el uso creciente de micropilotes en obras de infraestructura, se justifica la realización de este proyecto de grado. La

documentación detallada de diseño, tipos y aplicaciones de micropilotes, especialmente en suelos finos, contribuirá a enriquecer la base de conocimiento en el campo de la ingeniería civil y proporcionará información valiosa para estudiantes, profesionales y la industria de la construcción.

4. Alcance

Este proyecto de tesis se enfocará en investigar a fondo la aplicación de micropilotes como sistemas de cimentación, con énfasis en su implementación en suelos finos, como gravas y arenas, en el contexto de obras de infraestructura y estructuras de contención. Se realizará una exhaustiva revisión bibliográfica para destacar el diseño, la tipología y las aplicaciones de los micropilotes, con especial atención a las limitaciones de información existentes en la literatura académica y técnica. Además, se evaluará la efectividad de los micropilotes en suelos finos, comparando su rendimiento con métodos tradicionales de cimentación en términos de costos, tiempos de construcción y eficiencia estructural. Se explorarán aspectos ambientales y de sostenibilidad, analizando el impacto ambiental de los micropilotes en comparación con métodos convencionales. La documentación detallada generada contribuirá al enriquecimiento del conocimiento en ingeniería civil, proporcionando información valiosa para estudiantes, profesionales y la industria de la construcción.

5. Estado del arte

La tecnología de los micropilotes fueron introducidos en el campo ingenieril por primera vez en el año 1950 en Italia, fueron propuestos por la empresa especialista en fundaciones Fondedile bajo la inspección técnica del Dr. Fernando Lizzi como un método de cimentación en edificaciones y para recalzar monumentos históricos del país que estaban teniendo afectaciones físicas por la falta de capacidad portante que suelo demandaba con el paso del tiempo y se requieren sistemas que fuesen capaces de otorgar una buena resistencia estructural que pudiera aceptar las cargas transmitidas y tuviera repercusiones mínimas sobre la estructura, además de que desde el año 1945 se estaban llevando a cabo proyectos de reconstrucción de monumentos a causa de la II guerra mundial por lo que las obras estructurales no disponían de grandes espacios autorizados y tampoco de fácil acceso a las zonas de trabajo, es por esto que los micropilotes tuvieron un gran impacto positivo desde el momento de su aplicación, no tenía limitaciones de espacio se podían trabajar y aplicar sobre cualquier tipo de suelo. Desde entonces la aplicación de los micropilotes se fue extendiendo por toda Europa y en Estados Unidos en el año 1973, pero no fue sino hasta los años 80 que la aplicación de los micropilotes como un método de cimentación y recalzar estructuras existentes fueron aceptadas a nivel mundial. (Novarece, 2024)

Debido a la versatilidad de los micropilotes su uso a nivel mundial está en constante crecimiento, y no solo para hacer recalces de edificaciones sino por ejemplo Evelyn Cerrón y Teresa Delgado (2018), ciudad de lima, Facultad de ingeniería y arquitectura, en su tesis de opción de grado, denominada: "Diseño De Micropilotes Para Soportar Las Cargas De Las Viviendas Del Condominio Villa Chorrillos En La Avenida Hernando De Lavalle" Afirma que el uso de los micropilotes cumplen un rol muy importante en la ingeniería civil porque sus aplicaciones a este campo es muy versátil, ya que son una herramienta que brinda soluciones geotécnicas en estabilización de taludes, muros pantallas, mejoramiento de la capacidad portante de un suelo etc. Además de esto ofrece ventajas constructivas en zonas de limitado espacio de trabajo y de difícil acceso. En el documento investigativo Presentan una solución de cimentación para zonas con malas condiciones geotécnicas en las que evalúan el uso de micropilotes en la construcción de unas viviendas que se encuentran ubicadas en un suelo de baja capacidad portante, ya que lo estratos del suelo está compuesto por arenas finas, gravas y limos, y su superficie es una cubierta de material

de relleno, además de esto es una zona alto riesgo sísmico. concluyen en su proyecto que, aunque un solo micropilote o pilote pueda soportar las cargas que transmite la cimentación, por razones constructivas siempre se van a tener excentricidades a causa de la generación de momentos y es por esto que como mínimo se plantean la ejecución de dos micropilotes por cada zapata. (Cerrón del Castillo, 2018)

(López Nieves, 2014) en su tesis de posgrado, titulada "Diseño De Obra De Contención En El Costado Occidental De La Quebrada Menzuli Sede Recreacional De Comfenalco Santander " el caso de este proyecto es una falla que se presenta en el talud del costado oriental en la quebrada Menzuli, una de las principales causas de la falla en el talud es la socavación del pie del talud al ascender los niveles del agua en la quebrada y por consiguiente el deslizamiento de la parte superior del talud debido a las fuertes y permanentes lluvias en el sector, lo que generó que el material arcilloso presente en el estrato de suelo se saturara, después de hacer un análisis de estabilidad se recomendó la construcción de un muro de concreto armado apoyado sobre micropilotes. Este trabajo concluye que para obras de contención de taludes que presentan socavaciones importantes los muros deben ir cimentación con micropilotes a una profundidad tal que la socavación no afecte la integridad del muro.

(Sánchez Cuenca, 2023) en su artículo titulado: "Contenciones mediante micropilotes para excavaciones profundas en la zona metropolitana de Monterrey, Nuevo León" afirma que la utilización de una contención mediante micropilotes es una buena alternativa, ya que esta ofrece flexibilidad en cuanto a ejecución debido a que los pequeños diámetros de los micropilotes permite que se aproveche mejor la superficie edificable y a la adaptabilidad de la maquinaria requerida para la perforación que puede ser usada en cualquier tipo de terreno y generan rendimientos superiores a otros sistemas de perforación. concluyen que las contenciones realizadas con micropilotes resultan bastante competitivas en entornos urbanos y rurales en donde las condiciones de trabajo son exigentes.

(Córdoba Pereira & García Morales, 2022), en su trabajo investigativo titulado: "Elaboración De Ficha Técnica De Micropilotes Como Herramienta En El Área De Cimentaciones" afirman que en Colombia existe un vacío de información en la comunidad académica respecto al

micropilote como herramienta constructiva en general, consideran que una de las causantes es por la especificidad en el ámbito constructivo, además de que a su parecer no se profundiza estos temas en el entorno educativo de la carrera de ingeniería civil, por lo anteriormente mencionado realizan una ficha técnica acerca del micropilote, identificando generalidad, procesos constructivos y diseño de los micropilotes. Concluyeron que uno de los grandes retos que presentaron al momento de realizar la ficha técnica fue la recopilación de material bibliográfico, ya que observaron que la cantidad de información respecto al micropilote es mucho más escasa que las existentes en otras áreas de la ingeniería civil.

6. Marco teórico

La cimentación y mejora de terrenos son aspectos críticos en el diseño y construcción de obras de contención, donde la estabilidad y seguridad son fundamentales. Los micropilotes, o minipilotes, emergen como una alternativa innovadora en este contexto, ofreciendo soluciones eficientes y sostenibles para la cimentación y estabilización del suelo. Este marco teórico aborda aspectos clave relacionados con los micropilotes, centrándose en su diseño, aplicación y beneficios en obras de contención.

6.1. Fundamentos de Cimentación y Estabilidad de Obras de Contención:

La cimentación es un aspecto crítico en la construcción de obras de contención para garantizar la estabilidad estructural. (Das, 2012)

6.2. Tipos de Cimentación y Desafíos Geotécnicos en Obras de Contención:

Explorar diferentes tipos de cimentación, desde zapatas hasta pilotes profundos, permite entender la variedad de enfoques y los desafíos específicos en obras de contención. (Coduto, 2010)

6.3. Introducción a los Micropilotes:

Una comprensión detallada de los micropilotes, incluyendo su definición, características y clasificación, es esencial. (Tomlinson & M. J., 2007)

6.4. Diseño de Micropilotes en Obras de Contención:

El diseño efectivo de micropilotes en situaciones de carga vertical y lateral es crucial. (Peck, 1974)

6.5. Aplicaciones Exitosas de Micropilotes en Obras de Contención:

Estudiar casos específicos donde los micropilotes han demostrado ser exitosos brinda perspectivas valiosas. (Jim Sheahan, 2009)

6.6. Beneficios Ambientales y Sostenibilidad de los Micropilotes:

Evaluación de cómo los micropilotes pueden contribuir a la sostenibilidad mediante la reducción de la excavación y el uso eficiente de los materiales, es esencial. (Castellanos Guerrero, 2022)

6.7. Tecnologías Asociadas a los Micropilotes:

Explorar tecnologías emergentes como la inyección de resinas y la monitorización geotécnica aplicada a los micropilotes permite comprender su aplicación práctica. (Randolph, 2017)

6.8. Desempeño a Largo Plazo y Mantenimiento de Micropilotes:

Evaluar el comportamiento a largo plazo de los micropilotes y estrategias de mantenimiento es esencial para garantizar la durabilidad de las obras de contención. (Duncan, 1996)

7. Desarrollo de la metodología empleada

Antes de empezar con el diseño geotécnico y estructural del ejemplo propuesto debemos relacionarnos un poco con las variables que intervienen en estos diseños, por lo que en primera instancia se hará un repaso con la finalidad de apoyar de manera sustancial en la adquisición de conocimiento a estudiantes y profesionales en el área. A continuación, se dará un breve repaso de estas variables anteriormente mencionadas:

7.1. Fricción negativa en micropilotes

Es la fuerza de fricción que se desarrolla en el perímetro de la estructura de cimentación que tiende a hundir el micropilote, esta fuerza puede ser lo suficientemente grande como para provocar el fallo estructural del micropilote. La magnitud de la fricción negativa puede ser expresa de acuerdo a la **Ecuación 1**:

Ecuación 1

Determinación de la fricción negativa en un micropilote

$$q_n = \beta * \sigma' * \nu = M * K_s * \tan \phi'$$

En donde;

β =constante de proporcionalidad

K_s =Coeficiente de presión de la tierra en el suelo

$\tan \phi'$ =Fricción del suelo

M =Relación de la fricción de la pared.

7.2. Determinación del ángulo de fricción.

El ángulo de fricción en suelos granulares puede ser calculado como:

Ecuación 2*Determinación del ángulo de fricción de suelos granulares*

$$\varphi = 15 + (9.375 * N)^{1/2}$$

Donde

N es el número de golpes calculados en el ensayo SPT.

7.3. Módulo de Balasto.

El módulo de Balasto se puede definir como la resistencia del suelo a los esfuerzos laterales y verticales de los micropilotes. Como son esfuerzos verticales y horizontales se deben calcular de manera independiente, de la siguiente manera:

Para el cálculo del balasto vertical, en **suelos cohesivos**:

Ecuación 3*Módulo de Balasto K vertical para suelos cohesivos*

$$K = \frac{K_{30} * 0.30}{B}$$

Y para el cálculo del balasto vertical en **suelos arenosos**.

Ecuación 4*Módulo de Balasto K vertical para suelos arenosos*

$$K = K_{30} * \left(\frac{B + 0.30}{2 * B} \right)^2$$

Cabe resaltar que la variable B = Ancho del dado o zapata, K_{30} es un coeficiente que podemos determinar en función del tipo de suelo mediante los siguientes valores propuestos por Terzaghi:

Tabla 1

Valores K_{30} propuestos por Terzaghi

Valores K_{30} propuestos por Terzaghi			
Tipo de Suelo		K_{30} Máx	
Arena Seca o húmeda	Suelta	0.64	1.92
	Media	1.92	9.6
	Compacta	9.6	3.2
Arena Sumergida	Suelta		0.8
	Media		2.5
	Compacta		10
Arcilla	$q_u = 1-2 \text{ kg/cm}^2$	1.6	3.2
	$q_u = 2-4 \text{ kg/cm}^2$	3.2	6.4
	$q_u > 4 \text{ kg/cm}^2$		> 6.4

Tomado de (Das, 2012)

Para el cálculo del balasto horizontal en **suelos cohesivos**:

Ecuación 5

Módulo de Balasto K horizontal para suelos cohesivos

$$Kh = \frac{E}{B}$$

Y para el cálculo del balasto horizontal en **suelos arenosos**:

Ecuación 6*Módulo de Balasto K horizontal para suelos cohesivos*

$$Kh = nh * \frac{Z}{B}$$

Donde

E= Módulo de elasticidad del suelo

z= Profundidad del estrato

nh= Constante de proporcionalidad

Capacidad de tramos por fricción. Esta variable entra ya dentro del diseño geotécnico y es la capacidad de carga del micropilote por estrato de suelo.

Ecuación 7*Cálculo de la capacidad de carga por tramo*

$$Ps_i = Q_u * L_t * d * \pi$$

Donde

Ps=Capacidad por tramo

Qu=Resistencia al corte por estrato.

Lt=longitud del estrato del suelo y

d=es el diámetro del micropilote.

Una vez se calcule la capacidad por cada micropilote se requiere conocer la capacidad total de carga del conjunto de micropilotes en función de los estratos del suelo. Cabe resaltar que la carga transmitida por el dado o la zapata al conjunto de micropilotes la eficiencia se verá afectada en función de la cantidad de estos ya que a más micropilotes será menor su eficiencia.

Ecuación 8*Capacidad total a fricción conjunto de micropilotes*

$$P_s = \sum P_{s_i}$$

Ecuación 9*Cálculo de la eficiencia*

$$\eta = 1 - \left[\frac{(m-1)n + (n-1)m}{90 mn} \right] * \theta$$

Para finalizar la última variable del diseño estructural es la carga admisible por grupo de micropilotes, que puede ser expresada en la siguiente ecuación:

Ecuación 10*Carga admisible por grupo de micropilotes*

$$Carga\ admisible = \left(\frac{\frac{\sum P_{s_i}}{F.S.}}{\eta} \right)$$

Una vez identificadas las variables actuantes en un diseño estructural y geotécnico de un micropilote, se procede a hacer la hoja de cálculo.

8. Resultados

8.1. Diseño de micropilote

Para el diseño que se va a proponer, se considera un proyecto ubicado en la Ciudad de Bogotá, más específicamente en el Nororiente de la ciudad. Proyecto en el cual estuve trabajando, pero por motivos de confidencialidad, se va limitar solo a suministrar información general sin considerar nombres y detalles de las empresas involucradas en el proyecto.

Figura 1

Ubicación geoespacial del proyecto

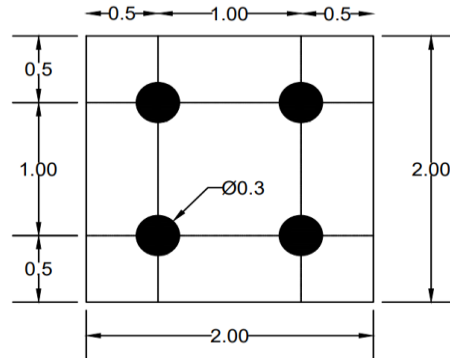


NOTA: Tomado de Alcaldía Mayor de Bogotá.

Recordemos que por lo general el diámetro seleccionado para el micropilote es de 30 cm, aunque en algunos casos específicos se hacen micropilotes de 40 cm de diámetro, este diámetro será el máximo permisible para un micropilote. Para este proyecto se definieron micropilotes de 30 cm de diámetro. Y mortero de 4000 psi principalmente por las condiciones del suelo presente, ya que debido a la cercanía de los micropilotes al momento de la inyección de este la presión generada por el bombeo socava internamente el suelo y se dispersa la lechada.

Figura 2

Propuesta de diseño con micropilotes de 30 cm de diámetro



Cabe resaltar que este caso de ejemplo consiste en el diseño de un micropilote de 0.3 m de diámetro por 30 m de profundidad, ahora se presentan los datos geotécnicos brindados por la empresa anónima. Datos que salen de ensayos de laboratorios y sondeos en el campo. en este caso se requirieron 2 sondeos de 30 metros en los que se obtuvo lo siguiente:

Tabla 2

Resultados de estudios de laboratorio

No. Tramo	Longitud del tramo	Peso unitario húmedo	Cohesión	Angulo de fricción	Resistencia al corte	Número de Golpes	Módulo de Elasticidad
	(m)	γ_t (ton/m ³)	c (kg/cm ²)	ϕ (°)	qs (ton/m ²)	N	E (ton/m ²)
1	2	1,4	0,88		17,5	11 a 27	1129
2	17	1,4	0,15		3,1	2 a 5	431
3	11	1,4	0,53		10,7	6 a 9	827

8.2. Diseño geotécnico

Una vez obtenidos los datos del laboratorio se puede calcular la capacidad de carga por tramos, está con la **Ecuación 7**:

Previo al cálculo de la capacidad de carga debemos conocer el diámetro de diseño del micropilote, que en el caso de estudio definimos como 30 cm.

Tabla 3

Cálculo de la capacidad por tramos

No. Tramo	Longitud del tramo (m)	Capacidad por tramo
		Ps (ton)
1	2	33,0
2	17	49,7
3	11	110,9

Una vez se obtuvo la capacidad por tramos se procedió a calcular la capacidad de carga total del micropilote en este suelo presente.

Tabla 4

Capacidad total de tramos

Capacidad total
Ps (ton)
33,0
49,7
110,9
193,6

Seguido de este cálculo se debe indicar en cuantos elementos se van a distribuir la carga de la zapata, en este caso en especial se eligieron 4 elementos. Por lo que se pudo calcular la eficiencia de 4 micropilotes que van a trabajar en este dado, cabe resaltar que el número de elementos a intervenir propuestos deben ir separados entre sí al menos 3 veces el diámetro de diseño del micropilote.

Recordemos que la eficiencia del grupo de micropilotes se puede calcular mediante la **Ecuación 9**. En este caso en especial el grupo de micropilotes tiene una eficiencia del 77%. Consideramos un factor de 1.5 para poder determinar la carga admisible del grupo de micropilotes **Ecuación 10**. Para el grupo de micropilotes tenemos que la carga admisible es de 99.12 T y la carga admisible por micropilote es de 24.78 T, recordemos que la carga por micropilote equivale a la total dividida en el número de elementos.

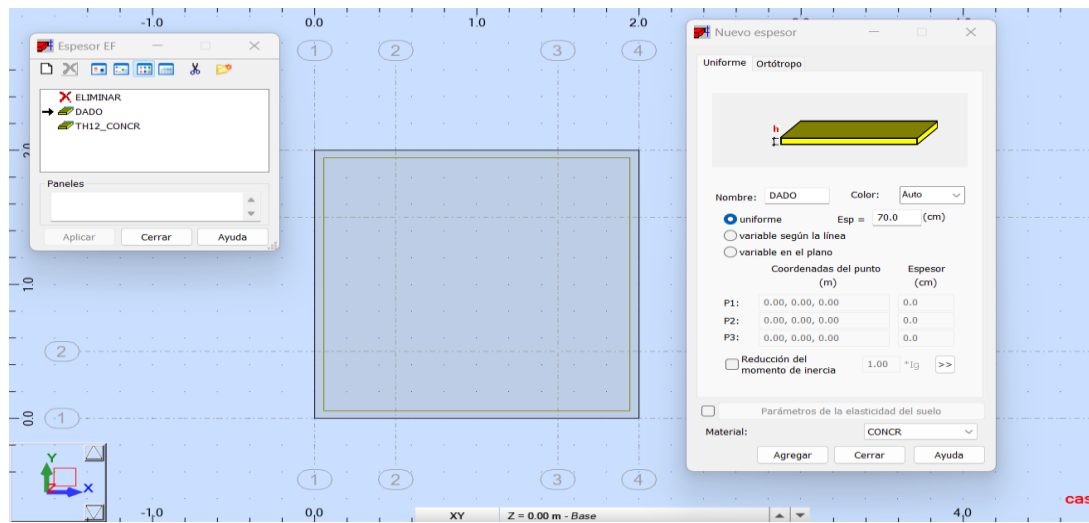
8.3. Diseño estructural

Para el diseño estructural mediante el software Robot Structural partimos del predimensionamiento que le habíamos hecho a los micropilotes, en el que se consideran los diámetros de cada elemento junto con la dimensión. En este caso de estudio en particular recordemos que los micropilotes tendrán una longitud de 30 metros con un diámetro de 30cm, teniendo en cuenta lo planteado en la **Figura 2**.

En la primera parte del estructurado en el software definimos las dimensiones de la zapata junto con el espesor para posteriormente definir la de cada uno de los pilotes propuesto, ver **Figura 3**.

Figura 3

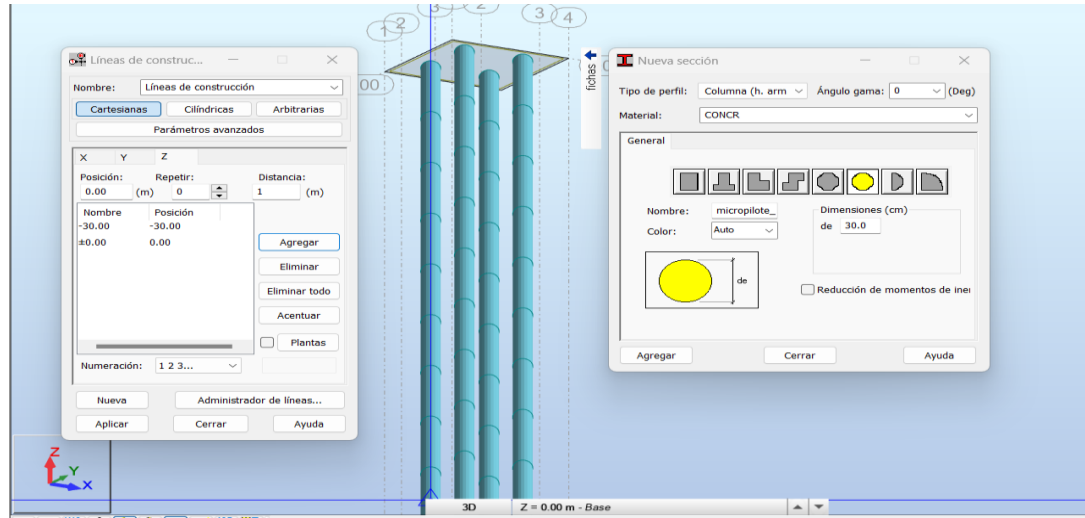
Predimensionamiento de la zapata



Una vez dimensionada la zapata se procede a dimensionar la profundidad, el diámetro y las cualidades del micropilote.

Figura 4

Predimensionamiento del micropilote



Una vez dimensionada la estructura se debe analizar los esfuerzos laterales de los estratos de sueño, el coeficiente de Balasto que se calcularon en el apartado geotécnico se recomienda hacerlo metro a metro, tanto como por área lateral (K_v) como por área proyectada (K_v). A continuación, presento la hoja de cálculo de estos valores de K y el modelado en el software:

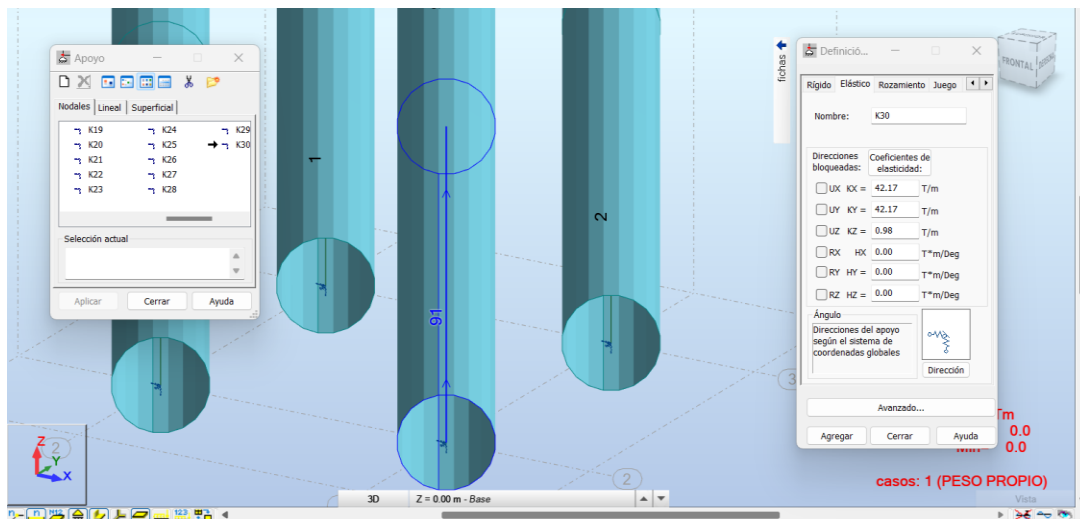
Tabla 5*Valores del coeficiente K por estrato de suelo*

ESTRATO DE SUELO	PROFUNDIDAD DEL ESTRATO	CONSTANTES DE RESORTE	
	m	Kv (T/m)	Kh (T/m)
1	1	2,400	564,5
	2	2,400	564,5
	3	4,800	215,5
	4	4,800	215,5
	5	4,800	215,5
	6	4,800	215,5
	7	4,800	215,5
	8	4,800	215,5
	9	4,800	215,5
	10	4,800	215,5
2	11	4,800	215,5
	12	4,800	215,5
	13	4,800	215,5
	14	4,800	215,5
	15	4,800	215,5
	16	4,800	215,5
	17	4,800	215,5
	18	4,800	215,5
	19	4,800	215,5
	20	9,600	413,5
3	21	9,600	413,5
	22	9,600	413,5
	23	9,600	413,5
	24	9,600	413,5
	25	9,600	413,5
	26	9,600	413,5
	27	9,600	413,5
	28	9,600	413,5
	29	9,600	413,5
	30	9,600	413,5

Tanto en el software como en el cálculo del coeficiente de Balasto se recomienda hacerlo metro a metro, por tal motivo se deben crear treinta cargas laterales, una por metro dentro del modelado.

Figura 5

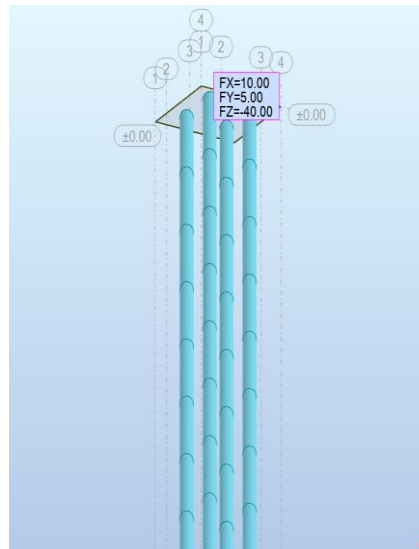
Valores del coeficiente K por estrato de suelo



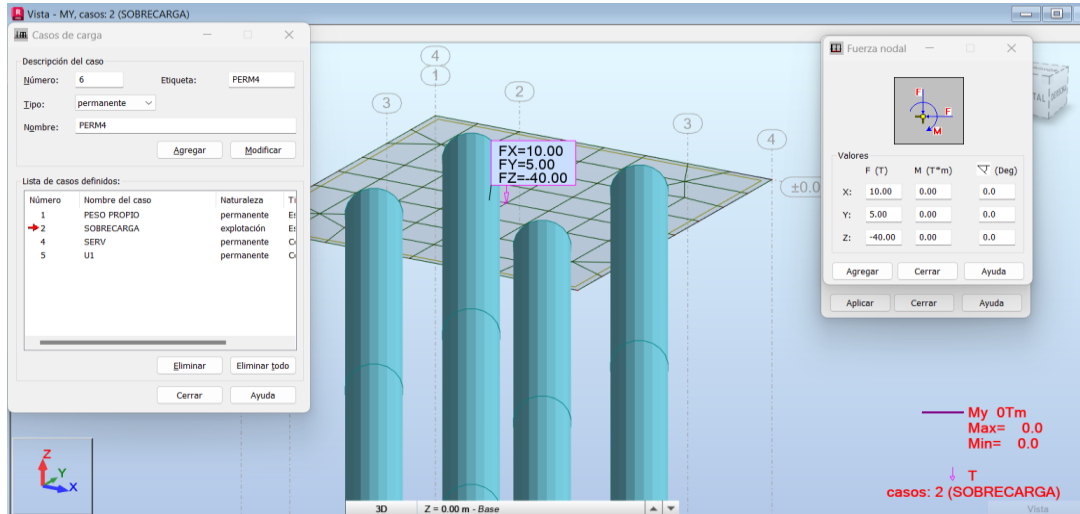
Una vez que los micropilotes tengan la constante de resorte y teniendo como base las dimensiones del dado se procede hacer el diseño del dado en el software, esté permitirá hacer la conexión entre los micropilotes y la estructura. Recordemos que se definió un dado de 2x2 m y un espesor de 70 cm.

Figura 6

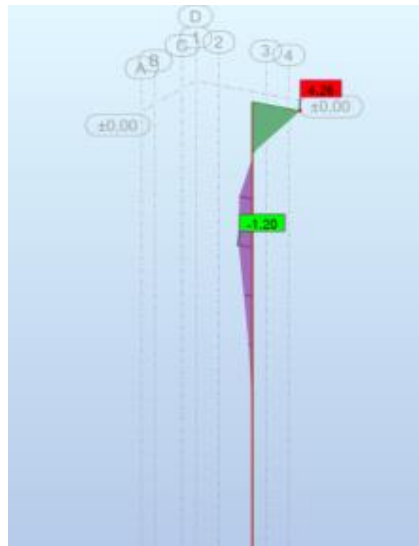
Dado junto con los micropilotes y la carga central



Para la carga nodal se deberá hacer un análisis previo de la estructura que está sobre el dado para determinar el valor de la reacción en el punto central de este. Para este caso de estudio se toma de referencia la estructura propuesta por los ingenieros Kevin P & Nicolas Morales en su trabajo de investigación “*Elaboración De Ficha Técnica De Micropilotes Como Herramienta En El Área De Cimentaciones*” los cuales plantearon una carga nodal de $F_x=10$ T, $F_y=5.0$ T y $F_z=-40$ T. Cabe resaltar que se debe hacer la respectiva combinación de carga teniendo en cuenta una carga permanente que es el peso propio y la sobrecarga para así hallar la carga de servicio y la carga última. (Córdoba Pereira & Garcia Morales, 2022).

Figura 7*Dado carga nodal y combinaciones de carga*

Una vez definidos los materiales y la carga de servicio el programa procede a calcular los momentos cortantes y axiales.

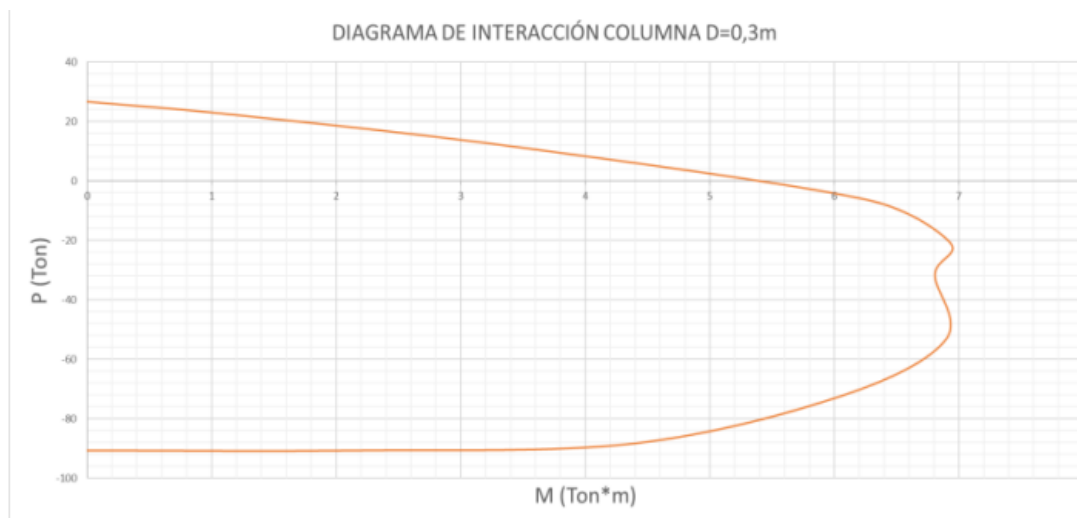
Figura 8*Momento Último*

Para las cargas y las dimensiones establecidas en el software obtenemos que momento por servicio es de $2.66 \text{ T}\cdot\text{m}$ y el momento nominal es de $4.26 \text{ T}\cdot\text{m}$ esto por lo que el programa de acuerdo a la norma mayorar las cargas.

Para finalizar se hace el diagrama de iteración en el que, para un elemento de 30 cm de diámetro, con una profundidad de 30 metros y una lechada de 24 Mpa. Se obtienen resultados concluyentes por lo que el micropilote puede soportar las cargas solicitadas. Esta afirmación parte de que los esfuerzos máximos se encuentra dentro del diagrama de iteración ya que el momento máximo del micropilote es de $5.15 \text{ T}\cdot\text{m}$ y el máximo admisible en el diagrama de iteración es de $6.95 \text{ T}\cdot\text{m}$.

Figura 9

Diagrama de iteración



NOTA: Tomado de (Córdoba Pereira & Garcia Morales, 2022)

Cabe resaltar nuevamente que mediante los ingresos *Kevin P & Nicolas Morales* en su trabajo de investigación, se tomaron referencias para definir las cargas actuantes en el dado de la zapata.

Una vez culminado el diseño estructural y geotécnico de los micropilotes y dando continuidad a la metodología propuesta se procede hacer una cartilla informativa del proceso constructivo de los micropilotes de acuerdo a la experiencia obtenida por el autor en la obra.

8.4. Cartilla informativa.

Recordemos que una de las ventajas más importantes de la implementación de los micropilotes es que pueden ser instalados en cualquier tipo de terreno, ambientes y en zonas de difícil acceso. La instalación de estos elementos estructurales está pensada para afectar lo menos posible el medio ambiente, ya que no son empleados sino solo la perforadora y no requiere aditivos ni químicos adicionales, también pueden ser empleados cerca de las laderas o canales ya que se puede tener un eficiente control del poco RCD generado, ya que por lo general se licua la arcilla la instalación del encamisado.

A continuación, se mencionan los pasos a seguir para tener una correcta instalación de los micropilotes:

- Se hace la instalación del equipo útil en la perforación, una vez ubicados los puntos a perforar por topografía y nivelado la rampa donde estarán el conjunto de micropilotes, se procede a poner la piloteadora en el micropilote indicado.

Figura 10

Replanteo y perforación del micropilote



- Se hace la instalación de la tubería de perforación hasta llegar a la totalidad de la perforación indicada. Por lo general se hace de una vez con el encamisado, pero por recomendaciones ambientales en esta obra en especial se recomienda hacer primero la perforación y después la instalación del encamisado para evitar filtraciones de RCD o lodos al canal

Figura 11

Instalación de la tubería de perforación y retiro de RCD



- Una vez instalada la tubería de perforación se procede a introducir el encamisado, y posterior a eso nivelar y anclar el micropilote con la ayuda de topografía. Para después inyectar mortero al micropilote. Recordemos que este vaciado con la bomba va llenando desde la punta hasta la superficie y genera el recubrimiento del micropilote. Hay que tener cuidado con la disipación del mortero por el subsuelo ya que la presión de la bomba puede generar fugas internas y esto en un futuro puede afectar a la eficiencia por fricción del pilote

Figura 12

Inyectado del mortero al micropilote



9. Conclusiones

- El diseño de micropilotes de 30 cm de diámetro y 30 m de profundidad, con mortero de 4000 psi, se ha abordado de manera detallada y específica para un proyecto en el Nororiente de la Ciudad de Bogotá.
- La información geotécnica obtenida de dos sondeos de 30 metros ha permitido calcular la capacidad de carga por tramos y determinar la capacidad total de los micropilotes en el suelo presente, considerando un diámetro de diseño de 30 cm.
- La eficiencia del grupo de micropilotes, distribuyendo la carga de la zapata en 4 elementos, se ha calculado con un resultado del 77%, indicando una distribución adecuada de la carga.
- El diseño estructural, realizado con el software Robot Structural, ha considerado el predimensionamiento de los micropilotes y ha analizado los esfuerzos laterales de los estratos de suelo, obteniendo una eficiencia del grupo del 77%.
- La carga admisible del grupo de micropilotes se ha determinado como 99.12 T, con una carga admisible por micropilote de 24.78 T.
- El diagrama de iteración ha demostrado que los micropilotes pueden soportar las cargas solicitadas, con un momento máximo de 5.15 Tm, dentro del límite admisible de 6.95 Tm.

10. Recomendaciones

- Se sugiere realizar estudios geotécnicos más detallados en proyectos similares para obtener información más precisa y refinada sobre las condiciones del suelo.
- La metodología propuesta, basada en el trabajo de Kevin P & Nicolas Morales, ha demostrado ser efectiva, pero se recomienda su validación en diferentes contextos geotécnicos.
- Es importante tener en cuenta las condiciones específicas del suelo al seleccionar el diámetro y las características del mortero de los micropilotes.
- Se aconseja realizar análisis de esfuerzos laterales de los estratos de suelo metro a metro para obtener resultados más precisos en el diseño estructural.
- La información obtenida de la carga nodal en el dado de la zapata, basada en el trabajo de Kevin P & Nicolas Morales, debe ser validada según las características específicas de cada proyecto.
- La cartilla informativa del proceso constructivo de los micropilotes debe incluir detalles específicos y prácticos, considerando la experiencia adquirida durante la obra y buscando mejorar la comprensión y ejecución del proceso constructivo por parte del personal involucrado.

11. Bibliografía

- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design*. McGraw-Hill Education.
- Castellanos Guerrero, W. &. (2022). Inclusión de micropilotes como elementos recuperadores de carga en cimentaciones: revisión del estado del conocimiento Inclusion of Micropiles as Load Recovery Elements in Foundations: Literature Review. 27(1-21). doi:10.14483/23448393.16984.
- Cerrón del Castillo, E. N. (2018). *Diseño de micropilotes para soportar las cargas de las viviendas del condominio Villa Chorrillos en la avenida Hernando de Lavalle*. Universidad de San Martín de Porres. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12727/3875>
- Coduto, D. P.-C. (2010). *Geotechnical Engineering: Principles & Practices (2a ed.)*. Pearson.
- Córdoba Pereira, K. A., & Garcia Morales, N. (2 de noviembre de 2022). *Elaboración de ficha técnica de micropilotes como herramienta en el área de cimentaciones [Tesis Pregrado, Universidad Católica]*. Bogota. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/fe7cb794-b18d-45f3-8522-8f11ac259424>
- Das, B. M. (2012). *Fundamentos De Ingenieria De Cimentaciones (7a ed.)*. Cengage Learning Editores S.A. de C.V.
- Duncan, J. M. (1996). State of the art: Limit equilibrium and finite-element analysis of slopes. 122(7), 577–596. Obtenido de [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1996\)122:7\(577\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1996)122:7(577))
- Jim Sheahan, P. (1 de abril de 2009). *Micropiles - an overview*. Obtenido de <https://vdocuments.mx/micropiles-an-overview.html?page=2>
- López Nieves, E. (2014). *Diseño de obra de contención en el costado occidental de la quebrada Menzulí sede recreacional de Comfenalco Santander, Bucaramanga*. Universidad de Santander. Obtenido de <https://repositorio.udes.edu.co/handle/001/2910>
- Novarece, J. C. (21 de enero de 2024). *Solución con micropilotes para cimentaciones, recalces, retención de tierras y estabilización de laderas*. Obtenido de https://www.site.biz/descargas/Conferencias_pdf/Soluciones_con_Micropilotes.pdf
- Peck, R. B. (1974). *Foundation Engineering*. . John Wiley and Sons (WIE).
- Randolph, M. &. (2017). *Offshore Geotechnical Engineering*. . CRC Press.

Sánchez Cuenca, M. C. (2 de noviembre de 2023). *ontenciones mediante micropilotes para excavaciones profundas en la zona metropolitana de Monterrey, Nuevo León*. Obtenido de https://www.keller.com.es/sites/keller-es/files/2020-01/02.%20Contenciones%20Micropilotes_MSC.pdf

Terzaghi, K. P. (2008). *Soil mechanics in engineering practice (3a ed.)*. . Wiley-Interscience.

Tomlinson, & M. J., & W. (2007). *Pile Design and Construction Practice*. Taylor & Francis Group.