



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**Estado de conocimiento en el diseño y construcción de
micropilotes**

Victor Gabriel Navarro Serna

Tesis de grado para optar al título de ingeniero civil otorgado por la UdeA

Orientador
Carlos Alberto Vega, Ph.D

Universidad de Antioquia
Facultad de ingeniería, escuela ambiental
Ingeniería civil
Medellín
2024

| | |
|----------------------------|---|
| Cita | Navarro Serna, 2024 |
| Referencia | (Navarro Serna, V., 2024). <i>Estado del conocimiento en el diseño y construcción de micro pilotes, 2015 - 2024</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. |
| Estilo APA 7 (2020) | |



Centro de Documentación de Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: Jon Jairo Arboleda.

Decano/Director Julio César Saldarriaga.

Jefe departamento: Claudia Helena Muñoz.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

“Cada conquista fue considerada imposible, la mayoría de las cosas por las que me preocupo nunca suceden, y si su vida está libre de fallas es porque no has arriesgado lo suficiente”.

En memoria de mi padre Jorge Ignacio Navarro y mi madre Gloria Amparo Serna, a quienes les debo todo.

Agradecimientos

Quiero expresar a través de estas líneas mis más profundo agradecimientos a aquellas personas que me apoyaron, a mis padres Jorge y Gloria, por esos años en los cuales dieron todo por mí, por dedicar su vida para que la mía fuera más fácil, por hacerme quien soy, quienes son el impulso de esta conquista. Estoy totalmente agradecido a todos los profesores que con sus comentarios y sugerencias hicieron de mí una persona con una excelente formación, principalmente a Carlos Vega por su paciencia y orientación que hicieron posible la realización de esta monografía.

Los homenajes son para mi familia, mi esposa Juliana y mis colegas, en especial a José que con las tardes de recocha y cerveza hicieron que mi carrera fuera más amena, en especial para esa persona que nunca dijo nada pero su sola presencia lo decía todo.

Para todos, mis agradecimientos por hacer de este también su sueño.

Resumen

Un t3pico de gran 3nteres en los 3ltimos a3os es el comportamiento de fundaciones de tipo micropilotes debido a sus ventajas constructivas y econ3micas, pero m3s que nada por sus competencias estructurales, por brindar efectos antideslizantes, cortantes, de compresi3n y de flexi3n, convirtiendolos en muchos casos en la 3pci3n m3s efectiva. Aunque no podemos olvidar que los materiales que los constituyen generan impactos negativos al medio ambiente. Existen ensayos que muestran las ventajas de los micropilotes cementados en la uni3n suelo-hormig3n, en el cual el cemento reacciona generando buenas caracteristicas mec3nicas permitiendo aumentar la carga m3xima y reducir los valores por asentamiento en comparaci3n con un pilote de cimentaci3n in situ. El presente trabajo tiene el objetivo de realizar un estudio sobre los avances, aplicaciones y mejoras en los micropilotes. Finalmente, con la informaci3n obtenida realizar un an3lisis sobre estos.

Abstract

A topic of great interest in the last years is the behavior of micro-pile type foundations due to their constructive and economic advantages, but most of all because of their structural abilities to provide anti-slip, shear, compression and exional effects, making them in many cases in the most effective option. However, we cannot forget that the materials that constitute them generate negative impacts on the environment. There are tests that show the advantages of cemented micropiles at the soil-concrete interface, where the cement reacts generating good mechanical characteristics, allowing the maximum load and to reduce the values for settlement in comparison with a foundation pile in situ. The purpose of this work is to carry out a study on the advances, applications and improvements in micropiles. Finally, with the information obtained, an analysis of these piles will be carried out.

Índice general

| | |
|---|-----------|
| Tabla de imágenes | 8 |
| 1. Consideraciones generales | 13 |
| 1.1. Definición de un micropilote | 13 |
| 1.2. Primeros trabajos sobre micropilotes | 14 |
| 1.3. Clasificación de los micropilotes | 15 |
| 1.4. Capacidad geotécnica de un micropilote | 16 |
| 1.4.1. Resistencia lateral | 19 |
| 1.4.2. Pandeo | 20 |
| 1.4.3. Asentamiento | 21 |
| 1.5. Fallo | 22 |
| 1.5.1. Fallo por asentamiento | 23 |
| 1.5.2. Fallo a compresión | 24 |
| 1.5.3. Fallo a tracción | 24 |
| 1.5.4. Fallo a flexión y cortante | 25 |
| 1.6. Curvas esfuerzo vs deformación | 26 |
| 1.7. Diseño de micropilotes | 26 |
| 1.8. Clasificación de micropilotes | 28 |
| 1.9. Fricción, carga y arrastre | 31 |
| 1.9.1. Carga residual | 32 |
| 1.10. Carga y asentamiento | 33 |
| 1.11. Estudio de asentamientos | 34 |
| 1.12. Teoría de expansión de cavidades | 36 |
| 1.12.1. Presión de expansión | 37 |
| 1.12.2. Exceso de presión de poro | 37 |
| 1.12.3. Modelo elástico | 38 |
| 2. Aplicaciones de los micropilotes | 39 |
| 2.1. Estabilidad en taludes | 39 |
| 2.2. Paraguas en túneles | 42 |
| 2.3. Micropilotes en cimentaciones de estructuras | 43 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3.1. Placa de cimentación | 44 |
| 3. Actualidad en micropilotes | 45 |
| 3.1. Metodologías | 45 |
| 3.1.1. Pruebas de carga | 45 |
| 3.1.2. Instrumentación geotécnica | 46 |
| 3.1.3. Modelado numérico | 48 |
| 3.1.4. Ensayo de integridad y calidad | 49 |
| 3.2. Avances | 50 |
| 3.2.1. Materiales mejorados | 50 |
| 3.2.2. Tecnología de perforación | 51 |
| 3.2.3. Diseño sísmico | 51 |
| 3.3. Formas constructivas | 52 |
| 3.3.1. Perforación con barrena continua | 52 |
| 3.3.2. Hélice continua | 53 |
| 3.3.3. Jet Grouting | 54 |
| 3.4. Estabilización de taludes | 55 |
| 3.4.1. Micropilote combinado con el método de vigas acopladas | 56 |
| 3.4.2. Micropilotes en presas de control | 57 |
| 3.4.3. Micropilotes en control de vibraciones | 58 |
| 3.4.4. Estabilización en vías férreas | 58 |
| 3.5. Micropilotes de energía | 60 |
| 3.6. Carga cíclica en micropilotes helicoidales | 64 |
| Referencias bibliográficas | 67 |

Tabla de imágenes

| | |
|--|----|
| Grupo de micropilotes en suelo cohesivo | 18 |
| Modelo para calcular la capacidad de elevación del grupo de micropilotes en suelos cohesivos | 19 |
| Distribución de cargas | 21 |
| Tipos de armadura de un micropilote | 27 |
| Secuencia en la construcción de un micropilote | 29 |
| Ejemplo de aplicaciones de micropilotes | 31 |
| Pilote de punta y fricción | 35 |
| Análisis del asentamiento de los micropilotes | 37 |
| Fuerzas verticales y horizontales en un talud | 41 |
| Ejecución de micropilote en tuneles | 43 |
| Esquema de un inclinómetro | 49 |
| Esquema de un extensómetro | 50 |
| Ejemplo de tomografía sísmica | 52 |
| Modelo de rigidez del suelo | 54 |
| Esquema de inserción con barrena continua | 55 |
| Sistemas de Jet Grouting | 57 |
| Esquema de micropilote combinado con el método de vigas acopladas | 63 |
| Esquema de micropilote en presas de control | 64 |
| Esquema del sistema de aislamiento de vibraciones | 65 |
| Esquema de micropilote de energía | 66 |
| Esquema en planta del sitio de prueba, sensores y temperatura | 67 |
| Esquema de diferentes tipos de configuración de tuberías en una pila de energía | 69 |
| Sistema de micropilote existente y reforzado | 69 |
| Configuración de la prueba de carga de campo | 71 |
| Esquemas de equivalencia de segmento cónico y segmento cilíndrico equivalente | 71 |
| Ábaco de Broms para pilotes flexibles | 77 |

| | |
|---|----|
| Grupo de pilotes en planta y en profundidad | 79 |
| Asentamiento en pilote | 81 |

Introducción

El empleo de pilotes nos transporta a hace 12.000 años atrás en donde hincaron columnas de madera en lagos poco profundos con el fin de edificar sus casas sobre ellos, un ejemplo es Venecia la cual se construyó en el delta pantanoso del río Po sobre columnas de madera, logrando refugiar a los italianos de los conquistadores del este de Europa. Antaño al siglo XIX, en las construcciones de edificios se utilizaban las zapatas continuas, mientras que el uso de pilotes era cuando el terreno mostraba que era incompetente para soportar las presiones que producían las zapatas. Con la llegada del desarrollo industrial, surgió una demanda de estructuras robustas y rentables, así la importancia del costo de las fundaciones sobre pilotes se incrementó, lo que obligó a los ingenieros a especificar un número adecuado de pilotes para brindar el soporte necesario a las estructuras. Lo que condujo a conocer la carga admisible de un pilote, efectuando experimentando con pilotes de prueba. Para conocer si el descenso de una edificación sobre pilotes se mantendrá en el intervalo de límites admisible, el diseñador debe tener en cuenta las presiones generadas en el terreno debido a la carga transferida por la cimentación, y estimar el hundimiento que estas presiones causarían. Para llevar a cabo este cálculo, es necesario tener un entendimiento sólido de las bases de la mecánica de suelos. Si los hallazgos de este estudio señalan que el hundimiento podría superar un valor adecuado, será necesario modificar el proyecto.

Uno de los desastres naturales más usuales son los derrape de tierra, los cuales tienen sus mecanismos de falla determinados por factores como la geología, la hidrología y la geomorfología. Estos eventos pueden ser desencadenados por una combinación de factores como lluvias intensas, sismos, cambios en la topografía y actividades humanas. Los mecanismos cambiantes anteriormente mencionados convierten los movimientos de tierra en un riesgo natural. Sus efectos incluyen un déficit monetario, desplazamientos internos y consecuencias adversas para el medio ambiente. En cuanto a las técnicas de estabilización, los micropilotes son usualmente usados debido a su beneficio constructivo al no requerir excavación.

Hoy en día el uso de micropilotes se ha transformado en una alternativa más y más popular para cimentaciones debido a su versatilidad y rapidez de ejecución. A pesar de ello, hay poca evidencia sobre la eficacia de los micropilotes en suelos propensos a la licuefacción.

Capítulo 1

Consideraciones generales

1.1. Definición de un micropilote

Los micropilotes son componentes fundamentales con diámetros no muy grandes, habitualmente no superiores a los 300 mm. Son utilizados para transferir cargas a niveles del terreno más hondos y resistentes, especialmente en terrenos difíciles o con limitaciones de espacio, este mecanismo es capaz de transferir cargas al terreno a un nivel competente y que integran elementos que ayudan a transferir las cargas de manera directa o indirectamente y que además ayudan a limitar deformaciones. Los micropilotes logran soportar cargas axiales significativas y laterales medidas, además se consideran un sustituto de pilotes hincados, los cuales causan una mínima alteración a las estructuras adyacentes, se pueden instalar en todo tipo de suelo y en cualquier condición. Cuando los suelos están saturados, la tendencia a densificar aumenta las presiones de poro, que no pueden disiparse rápidamente, lo que resulta en una disminución de los esfuerzos efectivos. La mayor parte de la carga aplicada a los micropilotes es resistida estructuralmente por el hormigón armado, pero una mayor habilidad estructural se logra mediante el aumento de las áreas transversal y superficial. Los elementos de acero llegan a extenderse hasta la mitad de la sección transversal, mientras que la lechada transfiere la carga a través de la fricción desde el refuerzo al suelo, y la resistencia de la unión lechada-suelo está influenciada por la clase de suelo y el método de inyección.

1.2. Primeros trabajos sobre micropilotes

Se han descubierto bastantes ruinas arqueológicas de estos procesos constructivos en zonas pantanosas, las cuales cumplían una doble función: servían como cimentaciones y separaban la base de las viviendas de las lagunas circundantes. Durante la Edad Media, se construían muchas edificaciones de este tipo tanto en Venecia como en Holanda [1]. Los micropilotes fueron ideados en Italia a inicios de la década de 1950 como una solución innovadora para sostener edificios y edificios históricos que habían recibido daños con el paso del tiempo, particularmente en el trascurso de la Segunda Guerra Mundial. Un contratista italiano Fondedile, una empresa italiana especializada, cuyo director era el Dr. Fernando Lizzi, creó el pilote de raíz, para aplicaciones de apuntalamiento. En la Europa de la posguerra, a pesar de la escasez de acero, el personal laboral era barato, generoso y frecuentemente tenía una enorme facultad mecánica. Estas condiciones impulsaron el desarrollo de elementos de pilotes de raíz in situ. Se llevaron a cabo pruebas de carga directa a escala real con un valor más o menos bajo, lo que facilitó la obtención y publicación de una gran cantidad de información sobre estas pruebas.

Durante la década de 1950, en Italia, hubo un aumento significativo en la utilización de pilotes de raíz. En 1962, Fondedile introdujo esta tecnología en el Reino Unido para el refuerzo de numerosos edificios históricos, y para 1965, ya se estaba implementando en proyectos de transporte subterráneo en Alemania. En ese momento, el concepto de micropilote reemplazó al de pilote de raíz por razones de propiedad. Después de 1957, las necesidades suplementarias llevaron a la introducción de sistemas de pilotes de raíz reticulados. Estos sistemas consisten en múltiples micropilotes verticales e inclinados entrelazados en una red tridimensional, formando una estructura compuesta de suelo/pilote confinada lateralmente. Las redes de micropilotes reticulados se emplearon para estabilizar taludes, reforzar muros de muelles, proteger estructuras enterradas y proporcionar soporte a otras estructuras y suelos.

En 1973, Fondedile introdujo los micropilotes en América del Norte mediante una serie de aplicaciones de refuerzo en la ciudad de Nueva York. Sin embargo, su adopción rápida no se produjo hasta mediados de los años ochenta en Estados Unidos. La difusión de casos de éxito publicados, el impacto continuo de los contratistas especializados y las crecientes demandas de consultores y propietarios que operaban en entornos urbanos históricos superaron las dudas y preocupaciones del mercado convencional [2].

Algunos de los trabajos recientes son: el trabajo de grado que tiene por nombre “Análisis teórico de métodos y procesos en construcción de micropilotes inyectados para fundaciones” [3] y en el 2015 se conoció la tesis doctoral:

“Comportamiento de micropilotes trabajando a flexión y/o cortante en estructuras de tierra”, el propósito fundamental de este estudio es analizar el comportamiento de los micropilotes sujetos a cargas de flexión y cortante, con un enfoque especial en su aplicación en taludes. Se incluirán obras ejecutadas, valores estadísticos relevantes, problemas de diseño y ejecución, así como métodos de cálculo simplificados y modelación teórica para cada escenario investigado [4].

1.3. Clasificación de los micropilotes

Como ya mencionamos el método de inyección es un parámetro que influye en la resistencia del micropilote, existen dos métodos de inyección que los clasifica en:

- **Diseño:**
El diseño dicta el método a emplear, esto es determinado por el sistema constructivo.

- **Método de inyección:**
Define la resistencia de la unión lechada-suelo, es decir, controla la capacidad del micropilote. Los tipos de inyección son clasificados en letras, de la siguiente manera:
A: la lechada es por gravedad.
B: la lechada se coloca bajo presión al mismo tiempo que se retira la tubería.
C: la lechada es por presión y gravedad.
D: la lechada es por presión y presurizada.

Los micropilotes son diferentes cuando son en conjuntos o individuales, lo que condujo a que se diferencien por lo siguiente: Caso 1, la armadura del micropilote está diseñada para resistir la mayor parte de la carga estructural, es decir, que transfiere la carga al estrato. Caso 2, los micropilotes refuerzan internamente el suelo, en otras palabras, proporcionan estabilidad y soporte [1, 2]. De acuerdo a lo anteriormente expuesto podemos decir que los micropilotes se usan en soporte estructural y en refuerzo, el soporte es para cimentaciones nuevas y apuntalamiento de cimentaciones existentes, en adaptación sísmica y apoyo de estructuras de contención.

1.4. Capacidad geotécnica de un micropilote

Las cargas máximas de tensión y compresión en la parte superior de un micropilote deben tener un factor de seguridad, la eficiencia de un conjunto de micropilotes en suelos cohesivos depende del espaciamiento entre ellos y el encuentro entre la base inferior del micropilote y el terreno cercano a la superficie, así:

$$Q_g = (2B_g + 2L_g)D\bar{s}_u + B_gL_gN_c s_u \quad (1.1)$$

En donde B_g es el ancho, L_g es el largo, D es la profundidad y s_u es la resistencia no drenada, el potencial de soporte N_c se determina mediante:

$$N_c = \begin{cases} 5 \left(1 + \frac{0,2B_g}{L_g}\right) \left(1 + \frac{0,2D}{B_g}\right) & \frac{D}{B_g} \leq 2,5 \\ 7,5 \left(1 + \frac{0,2B_g}{L_g}\right) & \frac{D}{B_g} > 2,5 \end{cases} \quad (1.2)$$

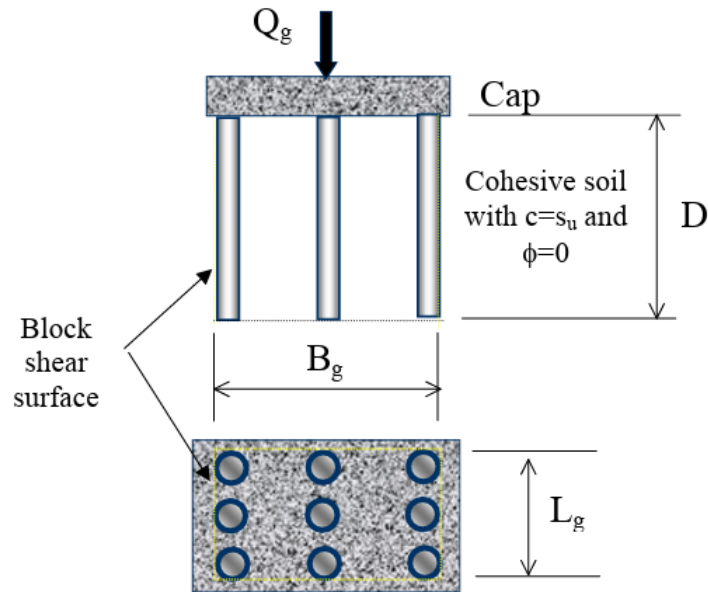


Figura 1.1: Grupo de micropilotes en suelo cohesivo [2].

Para suelos no cohesivos tenemos que:

$$Q_g = \pi N_\eta D_b L_b \alpha \quad (1.3)$$

Para asegurar seguridad ante un fallo por punzonamiento se tiene que:

$$\frac{Q_g}{B_g L_g} = q_p \leq q_o + \frac{1}{10} \frac{H}{B_g} (q_1 - q_o) \leq q_1 \quad (1.4)$$

En donde q_o es la resistencia del suelo más débil, q_1 es la resistencia del suelo más fuerte, q_p es la resistencia a la profundidad del micropilote y H es la distancia de elevación de los micropilotes. El potencial de soporte vertical de un conjunto de micropilotes en un suelo cohesivo es:

$$Q_{ele} = 2z(x + y)\bar{s}_u + W_g \quad (1.5)$$

Acá W_g es el peso efectivo del micropilote con el bloque de suelo entre micropilotes.

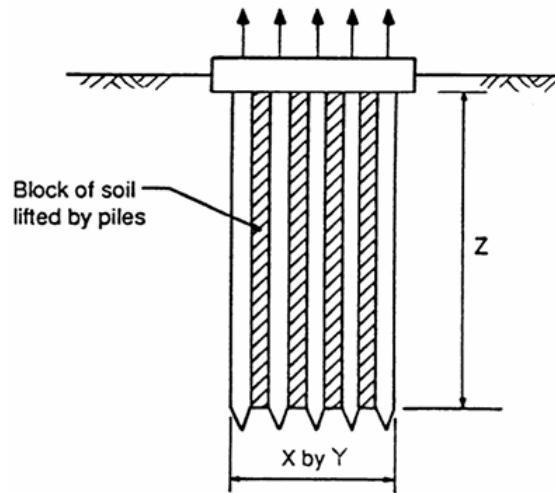


Figura 1.2: Modelo para calcular la capacidad de elevación del grupo de micropilotes en suelos cohesivos. [2].

Cuando es un suelo no cohesivo se toma una relación de 1H:4V (ver [Figura 1.3](#)), por lo que la capacidad de elevación es:

$$Q_{ele} = \frac{1}{3} \gamma \left(A_{base} + A_{superior} + \sqrt{A_{base} + A_{superior} D} \right)$$

$$A_{base} = B_g L_g \quad A_{superior} = \left(B_g + \frac{D}{2} \right) \left(L_g + \frac{D}{2} \right) \quad (1.6)$$

Donde γ es el peso específico. De acuerdo a lo anterior podemos decir que la capacidad de elevación de un grupo de micropilotes se calcula multiplicando la capacidad de elevación de un micropilote individual por el número total de micropilotes en el grupo. En otras palabras, si la capacidad de elevación de un solo micropilote es de X toneladas, y hay N micropilotes en el grupo, entonces la capacidad de elevación total del grupo será XN toneladas. Esto significa que cuantos más micropilotes tenga el grupo, mayor será su capacidad de elevación total. Ahora, para calcular los hundimientos por un grupo de micropilotes se supone que las cargas actúan sobre una zapata equivalente a $2/3$ de la longitud de los micropilotes cuando el suelo es uniforme (capa firme) pero si hay una capa arcillosa debajo del micropilote se encuentra a $8/9$. Entonces la presión transferida al suelo se distribuye en forma piramidal en una relación de 1H:2V (ver [Figura 1.3](#)), así la carga transportada por el grupo dividida por el área de la base pirámide es la presión en cualquier nivel, la cual se determina hasta una profundidad hasta que sea un 10% de la presión sobre la carga efectiva existente [2]. Los grupos de micropilotes en suelos sin cohesión producen hundimientos inmediatos, que son medidos de la siguiente manera:

$$\Delta H = \frac{H_o}{C} \text{Log} \left(\frac{P_o + \Delta P}{P_o} \right) \quad (1.7)$$

En donde P_o es la presión en el punto medio de la capa, H_o es la altura desde el punto medio de la capa y ΔP es el cambio de presión entre capas. Para encontrar el hundimiento total es necesario la compresión elástica

$$\Delta = \frac{PL}{AE} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i L_i}{A_i E_i} \quad (1.8)$$

Lo anterior nos muestra que depende de la carga, la dureza y de la transferencia de carga del micropilote al suelo, idealmente se considera que no se transfiere cargas al suelo a lo largo de la longitud del micropilote. La suma \sum la usamos cuando hay cambios en la sección transversal. Cuando se tiene un grupo de micropilotes es necesario de una zapata con el fin de repartir las cargas y el momento flector, en donde la carga de tracción y compresión se transfiere mediante la placa de apoyo y la placa rigirizadora, proporcionando la resisitencia a flexión. Ahora, los micropilotes pueden estar sometidos a una carga de compresión axial debida a fuerzas de movimiento descendente, la cual se le debe sumar al micropilote, estas fuerzas aparecen cuando el suelo puede hundirse y el micropilote pasa por estos, como lo son: rellenos, arcillas, limos y aguas subterráneas. En el cálculo de hundimiento de la zapata

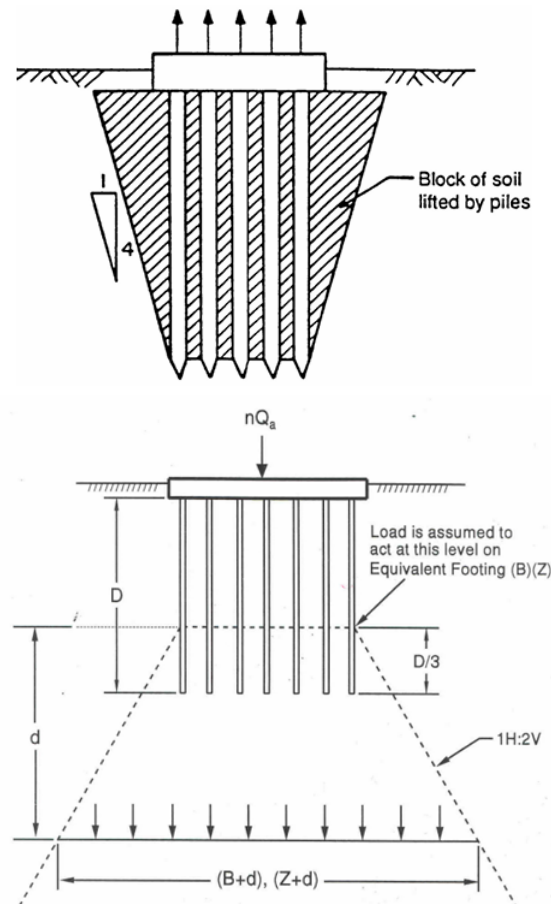


Figura 1.3: Distribución de cargas en relación 1H:4V y 1H:2V [2].

equivalente, es importante considerar el efecto de rigidez. Esto se logra al proporcionar el módulo del terreno y del pilote a los segmentos del área del cimiento terreno-pilote, y un módulo compuesto a la capa de terreno en medio del plano neutral y la altura de la base. En muchos casos, el hundimiento debido al suelo es insignificante. Esta metodología busca tener en cuenta tanto la dureza del suelo como la del pilote para estimar de manera más precisa el comportamiento de la cimentación [2].

1.4.1. Resistencia lateral

El uso de micropilotes para soportar cargas laterales es relativamente nuevo, lo que se suele hacer es conocer el momento flector que son generados por la conexión zapata-micropilote cuyo análisis es hecho en algún programa. Por

lo tanto la capacidad estructural se debe verificar para esfuerzos combinados (carga axial y momento flector) donde se supone que la capacidad estructural no se ve afectada por debilidades en la conexión con el revestimiento, el momento flector es:

$$M = SF_b \left(1 - \frac{f_a}{F_a}\right) \left(1 - \frac{f_a}{F_e}\right) \quad (1.9)$$

En donde f_a es la resistencia axial, F_a es el esfuerzo axial permisible que se permitiría si solo existiera la fuerza axial, F_b es el esfuerzo de flexión permisible que se permitiría si se doblara y F_e es el esfuerzo de pandeo de Euler. Cuando se tiene un grupo de micropilotes su comportamiento es influenciado por la separación entre estos y la deflexión puede ser de 2 a 3 la de un micropilote [5, 6] lo cual se debe a que el movimiento es menor y presenta mayor deflexión debido a la interacción micropilote-suelo, en otras palabras la eficiencia es menor que 1. Estudios demuestran que para distancias entre 6 y 7 veces el diámetros los efectos de grupo son despreciables en un arreglo lineal y para uno perpendicular con distancias superiores a 3 veces el diámetro [7], por lo que el uso de curvas p-y (esfuerzo vs deformación) son más efectivas, puesto que permiten estimar la deflexión del grupo. En el diseño de micropilotes se suele rebozar para dar una resistencia adicional a cargas laterales, pero trae consecuencias, ya que son relativamente rígidos haciendo que su movimiento lateral sea menor, traduciendo en mayor momento flector en el mallado, lo que no es recomendable en regiones propensas a sismos [8].

1.4.2. Pandeo

Sabemos que el tipo de suelo en el que se encuentra el micropilote nos determina la resistencia estructural, mientras que la resistencia lateral es dada por la lechada y el suelo circundante. El pandeo es un fenómeno que se debe a las restricción lateral por el suelo circundante, mientras que en suelos débiles el riesgo de pandeo es reducido, de manera similar sucede en suelos licuables. Por lo anterior es necesario realizar una investigación del suelo. Un análisis de pandeo consiste en comparar la carga crítica de pandeo para un micropilote cargado axialmente con la tensión axial máxima, la carga crítica de pandeo se determina como:

$$P_{cri} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} + \frac{E_s L^2}{\pi^2} \quad E_s^{limite} = \frac{1}{\left(\frac{AI}{A^2}\right) \left(\frac{E}{F_{acero}^2}\right)} \quad (1.10)$$

En donde E es la constante de elasticidad de acero, E_s es la constante de reacción lateral del suelo que rodea el micropilote a lo largo de la longitud,

I es el momento de inercia del micropilote y l es la longitud sin soporte del micropilote. Vemos que solo depende de las propiedades geométricas y materiales del micropilote, cuando $E_s^{limite} > E_s$ se debe considerar el pandeo y la carga admisible por pandeo, así:

$$P_{cri}^{adm} = \frac{F_a}{0,47F_{acero}} \left[0,4f'_{techada} A_{techada} + 0,47F_{acero} (A_{barra} + A_{ revesti }) \right] \quad (1.11)$$

Si hay un vacío en el suelo donde está el micropilote se debe diseñar para pandeo, donde se debe incluir un refuerzo interno a lo largo del micropilote. Ante un sismo un micropilote está sometido a 3 fuerzas y 3 momentos, conduciendonos a un comportamiento no lineal, así el micropilote se considera como una viga-columna soportada por un conjunto de resortes axiales, para lo cual su poca resistencia se debe a su dureza. En el caso en que no se tiene información estructural se debe asumir que las cargas sísmicas son asumidas por los micropilotes, se ha demostrado que para suelos licuables la resistencia lateral es de 0.1 a 1 por ciento del no licuable [9].

Finalmente, los movimientos estructurales pueden ser causados por: suelo incompresible, fluctuaciones de elevación del agua subterránea, deterioro de los cimientos, excavaciones profundas y construcción de túneles, conduciendo a fenómenos de pandeo, para el caso de los túneles los micropilotes se utilizan en: restricción de ampliaciones de zapata, altura libre baja, elevada exigencia en carga axial y condiciones difíciles de perforación.

1.4.3. Asentamiento

En los análisis de hundimientos es importante diferenciar entre el hundimiento causado por movimientos provocados por las fuerzas de la estructura y aquellos asentamientos que no son el resultado de cargas externas. El hundimiento en un micropilote se debe a esfuerzos de compresión, en donde el cálculo se debe a gran medida a sus capas de suelo no deformables, ya que son los primeros en entrar en carga, es decir, solo se tiene en cuenta suelos cohesivos de consistencia dura y granulares de compacidad dura. Podemos determinar el hundimiento elástico como:

$$S = \begin{cases} \frac{N_c L_E}{A_p E_p} & \text{para roca} \\ \frac{D}{90} \left(\frac{9N_c}{R_c} - 2 \right) & \text{para granular} \\ \frac{0,6N_c}{L_{qc}} & \text{para cohesivo} \end{cases} \quad (1.12)$$

En donde N_c es el esfuerzo axial, L_E la longitud de asentamiento, $A_p E_p$ es la dureza de la sección transversal, R_c es la resistencia al hundimiento, D es el

diámetro del micropilote, L es la longitud del micropilote y q_c es la resistencia de penetración. Como ya sabemos en un grupo de micropilotes influye el número, la separación, el tipo y secuencia de ejecución, todo esto nos dice que la resistencia es difícil de cuantificar con precisión mediante un solo parámetro debido a la influencia de varios factores, estos pueden incluir características del suelo, como la cohesión, la fricción y la composición geológica, así como el diseño del micropilote en sí, como su longitud, diámetro y método de instalación. Los resultados experimentales muestran que la mejora a cargas verticales es debido a la densificación de la arena y al confinamiento del suelo entre ellos, y que una separación óptima entre centro y centro es para 2.5 a 4 veces el diámetro, para valores inferiores puede provocar una ruptura en bloque y para valores mayores se comportan como micropilotes aislados [10].

1.5. Fallo

La reevaluación del cálculo de micropilotes implica tener un entendimiento previo de los diferentes tipos de fuerzas que afectan, tales como las cargas transmitidas por la estructura y las condiciones del terreno que se busca estabilizar. Por consiguiente, se deben llevar a cabo las siguientes verificaciones: la estabilidad global, la capacidad de carga del terreno, la integridad estructural y la posibilidad de socavación.

- Fallo de estabilidad global:
Supone diversas superficies de ruptura las cuales engloban a toda la cimentación.
- Fallo de capacidad de soporte del terreno:
Puede ocurrir debido a la falta de resistencia del terreno, lo que se manifiesta en formas como hundimientos (cuando la capacidad del terreno es inferior a la carga), arranque (ocasionado por esfuerzo rasante en el tronco) y ruptura horizontal del terreno (cuando las presiones horizontales agotan el terreno). Estos fenómenos son indicativos de debilidad o inadecuación del suelo para soportar las cargas aplicadas.
- Fallo estructural:
Puede ocurrir cuando las fuerzas transmitidas exceden la resistencia del micropilote o cuando exceden la resistencia del enlace entre el micropilote y la estructura.

En algunas estructuras los micropilotes tienen inclinación respecto al eje del micropilote, lo que ocasiona una disminución en la capacidad de soporte tanto en dirección axial como lateral, así:

$$\left(\frac{R_c}{R'_c} \cos\theta\right)^2 + \left(\frac{R_c}{R_h} \sin\theta\right)^2 = 1 \quad (1.13)$$

En donde R_c es la resistencia a un ángulo θ , R'_c es la resistencia al fallo de hundimiento y R_h es la resistencia a la carga horizontal [10].

1.5.1. Fallo por asentamiento

El valor del fallo por asentamiento debe ser igual o mayor al esfuerzo axial (compresión) difundido por la estructura, para lo cual se debe considerar o no la contribución por punta, entonces:

- Sin resistencia por punta:
Solamente se considera la resistencia por tronco, así:

$$R_{cd} = R_{fcd} = A_L r_{fcd} = \sum_i^n A_{Li} r_{fcdi} \quad (1.14)$$

En donde R_{cd} es la resistencia al fallo por hundimiento, R_{fcd} es la resistencia por tronco frente a esfuerzos de compresión, A_L es el área del micropilote y r_{fcd} es la fricción por tronco frente a esfuerzos de compresión.

- Con resistencia por punta:
En este caso es simplemente la suma de la solidez por tronco y por punta, entonces

$$R_{cd} = R_{pd} + R_{fcd} \quad (1.15)$$

La fricción por tronco a una profundidad z se puede obtener mediante:

$$r_{fcd}(z) = \frac{c'}{F_c} + \frac{\sigma_H \tan\delta}{F_\psi} \quad (1.16)$$

En donde σ es la presión horizontal, δ es el ángulo de fricción, c' es la cohesión efectiva y F_c, F_ψ son los coeficientes de minoración. Como es bien sabido la presión horizontal puede variar con la profundidad, por lo tanto

$$\sigma_H(z) = \begin{cases} k\sigma_V + \frac{P}{3} & \text{para } z \geq 5m \\ k\sigma_V & \text{para el resto de casos} \end{cases} \quad (1.17)$$

En donde σ_V es la presión vertical y k es el coeficiente de empuje. Empíricamente la solidez por tronco es:

$$R_f = \frac{R_c}{F_r} \quad (1.18)$$

En donde R_c es la solidez a compresión. Es importante recordar que cuando un micropilote atraviesa zonas de suelos con huecos la solidez por tronco es cero [10]. La solidez por tronco se puede calcular de una manera práctica mediante:

$$\begin{aligned} R_f = \eta R_c \quad \eta = 0,6 \quad & \text{para cargas de compresión y tracción} \\ \eta = 0,75 \quad & \text{para esfuerzos de tracción} \end{aligned} \quad (1.19)$$

Los abacos de Broms son herramientas útiles para calcular la solidez a la carga horizontal basándose en el peso específico y las características del suelo. Estos solo sirven para terrenos granulares ($c = 0$) o puramente cohesivo ($\phi = 0$) [10].

1.5.2. Fallo a compresión

La solidez estructural de un micropilote sometido a esfuerzos de compresión se puede precisar de la siguiente manera:

$$N_c = \frac{R}{120F_e} (0,85A_c f_{cd} + A_s f_{sd} + A_a f_{yd}) \quad (1.20)$$

En donde A_c es el área de la lechada, f_{cd} es la solidez de la lechada, A_s es el área del acero, f_{sd} es la solidez del acero corrugado, A_a es el área tubular, f_{yd} es la solidez del acero tubular, F_e es el coeficiente de fluencia del tipo de ejecución y R es el factor empírico de pandeo, este lo podemos calcular como [10]:

$$R = 1,07 - 0,027C_R \quad C_R : \text{Coeficiente adimensional} \quad (1.21)$$

1.5.3. Fallo a tracción

La solidez estructural en un micropilote sometido a tracción se puede precisar de la siguiente manera:

$$N_t = \frac{10}{11} (A_s f_s + A_a f_y) \quad (1.22)$$

En donde A_s es el área acero corrugado, f_s es la solidez del acero corrugado, A_a es el área tubular y f_y es la solidez del acero tubular [10].

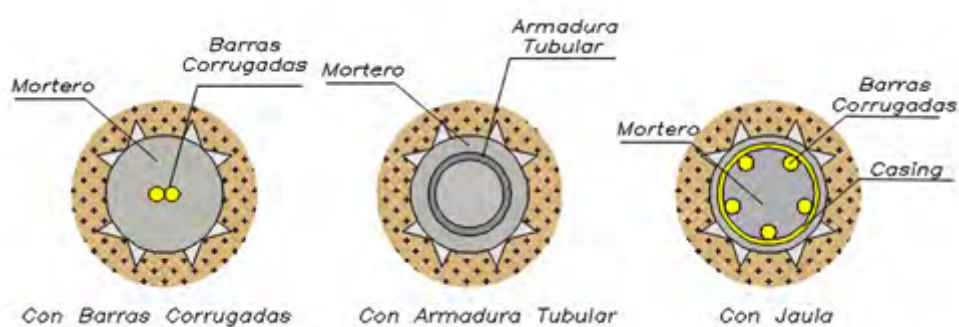


Figura 1.4: Tipo de armadura en micropilotes [15].

1.5.4. Fallo a flexión y cortante

Para encontrar la solidez estructural de un micropilote a flexión, a cortante o a esfuerzos combinados, para lo cual solo se supone que el acero tubular es quien soporta estos esfuerzos. Para evaluar el momento flector máximo del micropilote debido a una carga horizontal la idea es tomar el micropilote como una ménsula sujeta solo a cargas externas y donde la acción del suelo se convierte en un incrustamiento ficticio a cierta profundidad, es una aproximación utilizada en algunos análisis de cimentación. Esto se basa en considerar que el micropilote actúa como una especie de viga empotrada en el suelo a cierta profundidad, lo que simplifica los cálculos de carga y distribución de fuerzas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta simplificación puede no reflejar completamente el comportamiento real del micropilote en el suelo, por lo que siempre se deben realizar análisis detallados y considerar otros factores relevantes en el proyecto y la elaboración de fundaciones, por lo tanto:

$$L_{ef} = 1,2fL_e \quad (1.23)$$

Siendo L_{ef} la extensión de empotramiento ficticio, L_e la longitud elástica del micropilote y f es una constante que se basa en el vínculo de la constante de elasticidad del terreno superficial y de la dimensión L [10].

1.6. Curvas esfuerzo vs deformación

Los micropilotes se emplean cuando el suelo de cimentación carece de la solidez mecánica necesaria para soportar las cargas previstas. Por ende, se hace indispensable transferir dichos esfuerzos a suelos con una capacidad portante superior, con el fin de prevenir asentamientos, roturas o fallos en la estructura. La zapata es más fácil de diseñar, no obstante, la condición cambiaría cuando la zapata tiene una amplitud real distinta colocando pesos y logrando elevadas esfuerzos. Las curvas de tensiones vs desplazamientos relativos (p-y) son calculadas mediante:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{\delta_1}{\delta_2} \right)^e \quad (1.24)$$

En donde $\sigma_{1,2}$ son las tensiones, $\delta_{1,2}$ los desplazamientos y $e = 0,4$. Esto implica que podemos fundamentar el diseño para deformaciones en correlaciones entre tensiones y desplazamientos (p-y) que son la curva de aproximación, se conoce que hay una semejanza entre la reacción a las presiones en la zapata y la reacción en la cima de un pilote. Dicha semejanza capacita a los expertos para emplear fórmulas en el cálculo de la aptitud de carga de los pilotes de punta. Generalalmente, los valores propuestos para las constantes de resistencia de presión para pilotes de punta N_c , están alrededor 2 y 3 los de N_q . Por consiguiente, la relevancia primordial de la capacidad portante disminuirá, dando paso a un enfoque más destacado en el estudio de asentamientos y deformaciones en la creación de la edificación [10].

1.7. Diseño de micropilotes

En el diseño de micropilotes rara vez se realiza un análisis de asentamientos, son enfocados en encontrar un factor de seguridad en el límite de carga, lo cual no es viable económicamente, entonces los diseños en micropilotes se deben enfocar en definir una distribución de solidez por toda la longitud del micropilote encontrando la localización de las fuerzas de equilibrio, apreciar el valor de las fuerzas de fricción almacenadas, establecer la relación carga desplazamiento y la distribución de cargas en el momento del asentamiento, todo lo anterior permite lograr un resultado satisfactorio en el diseño. Ahora, es influyente que en el estudio de asentamientos se debe diferenciar entre asentamientos por causas externas y propias del pilote. La razón más

habitual para optar por cimentaciones sobre pilotes en lugar de zapatas corridas, losas u otros tipos de cimentación es minimizar el asentamiento de los cimientos [11, 12].

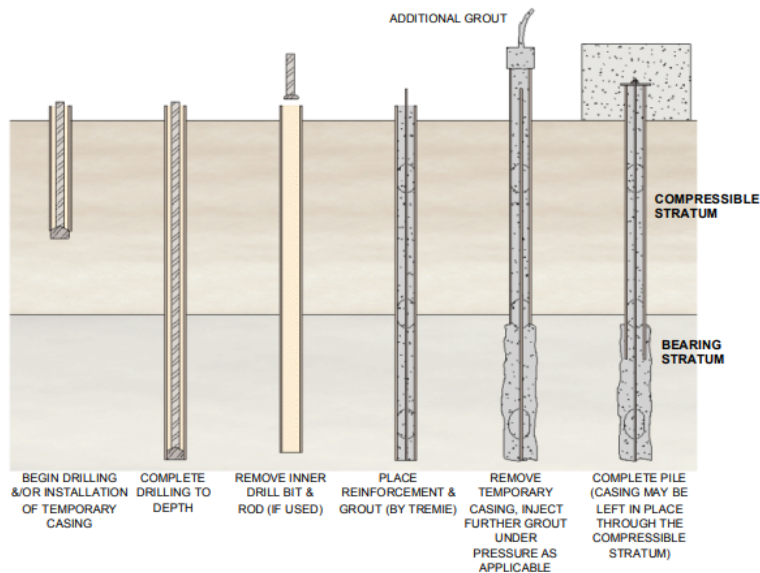


Figura 1.5: *Secuencia en la construcción de un micropilote [2].*

Hace años se decía que si la aptitud de sostener es segura la naturaleza velará por el resto. La excesiva de confianza en el diseño se reflejaba en la flata de seguridad, entonces para conocer la capacidad portante, un estudio de asentamientos es importante en la creación de edificaciones sobre micropilotes. Para un conjunto de micropilotes portantes en rocas puede ser más de experiencia, que no se contemplaran asentamientos relevantes. Para evaluar los asentamientos en diferentes tipos de terreno, será necesario realizar un exhaustivo análisis. Para llevar a cabo una evaluación precisa de los asentamientos, es fundamental contar con un perfil del terreno bien definido y comprender el régimen de agua en los poros. Además, es esencial incorporar las variaciones en los niveles de la capa freática en las estimaciones. Al diseñar edificaciones sobre pilotes, es fundamental considerar una serie de factores adicionales. Estos incluyen la distribución de las resistencias tanto en la punta como en los lados del pilote en el estado de balance a través del tiempo, las presiones aplicadas en la parte superior del pilote, la presión de rozamiento situada en el plano neutro a causa de la concentración de esfuerzos de rozamiento adversas, la fuerza cortante a lo largo del períme-

tro del pilote, la interacción carga-desplazamiento en la cima del pilote y la disposición de cargas sobre el pilote [11].

1.8. Clasificación de micropilotes

En el mercado actual, se encuentra una amplia gama de pilotes diseñados para abordar diversas necesidades geotécnicas, como el apoyo de cimentaciones o la fijación de taludes. Su utilización se justifica no solo por su capacidad para soportar cargas laterales y axiales, sino también por su eficacia en la superación de restricciones en el sitio [13]. De acuerdo a la literatura podemos clasificar los micropilotes conforme al material, aplicación y método constructivo.

1. Materiales

A través de los años en la fabricación de micropilotes se han usado diversos materiales como lo son el acero, la madera, el cemento y finalmente por una composición de cemento-acero convirtiéndose en los que predominan actualmente, esto se debe a su resistencia y durabilidad.

2. Aplicación

Los micropilotes de caso 1 se definen como elementos directamente cargados que sostienen la mayor parte de la carga aplicada. Estos micropilotes transfieren las cargas a estratos más sólidos, en forma individual o en conjunto, actuando de manera similar a pilotes convencionales. Por otro lado, los micropilotes de caso 2 tienen como objetivo contener y reforzar el terreno para proporcionarle resistencia a las cargas. Estos micropilotes se utilizan para crear un terreno reforzado mediante una malla reticulada de micropilotes, capaz de ofrecer soporte frente a cargas o problemas de estabilización. Este sistema se conoce como malla de micropilotes reticulados [2]. Ambos enfoques tienen diversas aplicaciones en el ámbito de estructuras de soporte o refuerzo in-situ. En el caso de las estructuras de soporte, se utilizan para cimentaciones, refuerzo de cimentaciones existentes (ya sea reparación, reemplazo, protección o mejoramiento) y para el refuerzo sísmico. Por otro lado, en cuanto al refuerzo, se emplean para garantizar la seguridad en terrenos con pendientes, construcción de estructuras de retención de terreno, fortalecimiento del terreno, minimización de asentamientos y mejora de la fijación de la estructura.

En 1982 se introduce una red reticulada de micropilotes capaz de crear

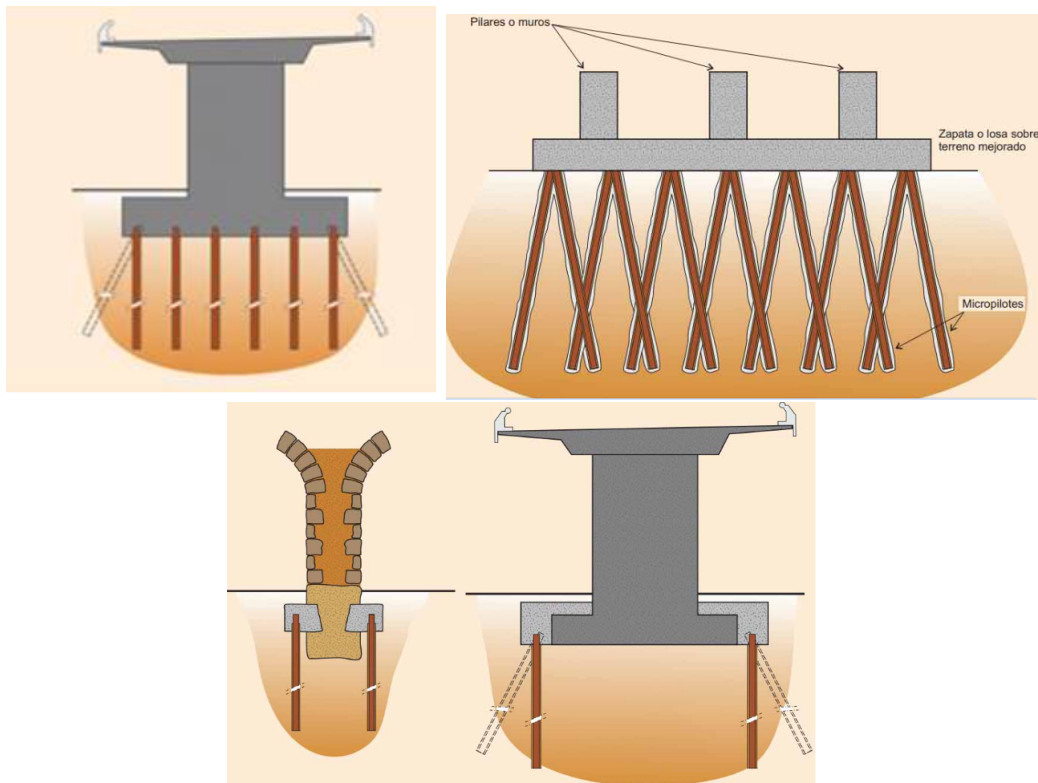


Figura 1.6: Ejemplo de aplicaciones de los micropilotes (a) Cimentación de planta nueva. (b) Recalce de cimentación existente. (c) Mejora del terreno [22].

un terreno reforzado, funcionando como lo son los muros de contención por gravedad. Esta estructura proporciona solidez contra fuerzas de corte, tensionales y compresivas. Además, se propone que los micropilotes individuales o en grupos se utilizan con el fin de unir áreas de desplazamiento con zonas invariantes [14, 23]. Su valor fundamental radica en su capacidad para resistir el corte debajo de las superficies de falla, lo que ayuda a prevenir la inestabilidad de movimientos de tierra.

2.a Diseño de micropilotes para firmeza de laderas

Para el diseño de micropilotes se emplea el proceso de diseño propuesto en la FHWA (Federal Highway Administration) del 2005 con el objetivo de estabilizar taludes. El primer enfoque son micropilotes. Los micropilotes se instalan a través de la pendiente insegura hasta una extensión de bajo de la capa de falla. Es fundamental que estén anclados al terreno mediante una viga de concreto. De esta manera, los micropilotes operan de manera individual para soportar cargas axiales, cortantes y momentos flectores. El espaciado entre los micropilotes se determina según la cantidad requerida por metro de lon-

gitud proporcionando la fuerza de fortalecimiento necesaria. Se ajustan los parámetros a un factor de seguridad FS igual a 1 y se estiman los parámetros de estudio.

Los micropilotes deben tener la capacidad de suministrar una fuerza suficiente para elevar el factor de seguridad FS desde un valor inherente del talud a un valor necesario. Para lograr esto, se requiere determinar la amplitud de la tenacidad necesaria, la cual cambia la ubicación del micropilote en la ladera. Es esencial realizar su modelado, y una forma de hacerlo es representar la resistencia proporcionada como una cohesión atribuida al estrato del terreno donde el micropilote penetra la capa crítica de deslizamiento, esto se realiza mediante:

$$H_{req} = cw \left(\frac{1}{\text{Cos}(\alpha)} \right) \quad (1.25)$$

En donde c es la cohesión del terreno, w es el ancho de corte, α es ángulo de la superficie del corte y H_{req} es la fuerza al corte necesaria. Una alternativa consiste en introducir el parámetro de resistencia del micropilote en cualquier ubicación dentro del talud. Esto permite determinar la fuerza de tenacidad del micropilote y la posición en la ladera logrando un margen de seguridad [15].

3. Procedimiento constructivo

De acuerdo a su realización en obra se pueden dividir en micropilotes hincados o perforados, en cualquiera de los dos casos se debe tener una descripción del terreno, equipos y requerimiento técnico.

3.a Micropilotes hincados:

Estos micropilotes se han extendido a micropilotes de acero se utilizan como un apoyo estructural para cimentaciones o para mejora, consolidación del terreno y reducción de asentamientos. Su procedimiento se fundamenta en la introducción del elemento o de un tubo clavado para crear presión en dirección del elemento llegando a la profundidad pedida o en el rechazo del suelo. Por ende se necesita de masas, equipos de presión y dispositivos de medida de carga.

3.b Micropilote perforados:

Son ampliamente reconocidos y empleados debido a su refuerzo de acero inyectado, lo que les confiere una mayor capacidad de carga y una transferencia de cargas más eficiente al terreno. Se destacan por ser ideales en aplicaciones para la fijación de taludes y, más recientemente, como mejora sísmica a causa de su versatilidad. El procedimiento es con equipo de rotación compuesta por

un taladro y tubería de revestimiento para lograr la profundidad requerida, después se introduce la coraza de acero para aplicar la lechada. Los métodos más reconocidos son los siguientes: inyección previa (realizada antes de la ejecución del micropilote), inyección única (rellenando la brecha del hueco ocasionado por el taladro y el armazón del revestimiento en una sola etapa), inyección repetitiva (donde se vierte inicialmente la lechada entre el armazón y la brecha, seguida de otra aplicación por medio de válvulas de inyección antirretorno) y la inyección repetitiva y selectiva (comenzando con la primera inyección estándar y luego realizando múltiples reinyecciones) [16].

Comunmente la inyección se realiza utilizando una batidora, agitadores y un impulsor de inyección. Si hay entubación, se quitaría al momento en que se lleva a cabo la inyección. Luego, se procedería a la conexión con los elementos de unión.

1.9. Fricción, carga y arrastre

Existen trabajos que hacen énfasis en la carga de movimiento, el trabajo de Endo en 1969 [17] nos muestra la interacción entre las cargas de arrastre, las cargas en el pilote, los hundimientos y la inserción de la cima del pilote, no se ven afectados por la presión de arrastre de manera similar a las presiones externas. En otras palabras, la presión de arrastre no afecta la capacidad portante ni los hundimientos del pilote. De hecho, un pilote expuesto a presiones de arrastre tiende a ser más rígido que uno que no experimenta mucha presión de arrastre. El estrato en el trabajo de Endo era un manto acuoso, con una capa de 9 m de arena limosa, seguida de limo incluso los 25 m y finalmente dos capas de limo-arenoso y limo llegando a los 41 m, la capa freática se encontraba cerca de 1 m debajo de la superficie, debido a la consolidación del terreno condujo a que el terreno se asentara creando cargas de arrastre y un arrastre descendente. Durante los 672 días de mediciones se encontró que el ingreso de la cima del pilote en la arena aumento, mostrando un comportamiento lineal entre la relación carga-penetración, resumiendo el trabajo tenemos:

- El desplazamiento lateral está controlado por las presiones efectivas cuando hay movimientos menores del terreno.
- Un pilote expuesto a presiones de movimiento tiene un reparto de presiones debida a la fricción lateral en el plano neutral, el terreno y el pilote se asientan de igual manera.

- La localización del plano neutral se debe a las condiciones de equilibrio que se explican por las fuerzas de equilibrio.
- Las cargas vivas reducen las cargas de movimiento.
- Cuando la resistencia en la cima es mayor, el plano neutral se sitúa a una profundidad menor.

Es esencial enfatizar que la presión de movimiento es directamente ligada a la resistencia estructural del pilote. No está relacionada con la habilidad de soporte o los hundimientos del pilote. Más bien, la carga de movimiento se percibe como un aspecto negativo para el pilote. Sin embargo, un pilote sometido a notables presiones de movimiento será más firme que uno que no experimente enormes presiones de este tipo. En consecuencia, mostrará menores deformaciones ante variaciones en las cargas ejercidas en la cabeza del pilote. El movimiento descendente representa un desafío significativo. Fellenius ha propuesto esta aproximación como el diseño unificado de fundaciones, que aborda aspectos como capacidad de carga, asentamientos, cargas de movimiento y movimiento descendente [14, 18, 30, 32].

1.9.1. Carga residual

La capacidad de un pilote se refiere a su resistencia máxima, que es la carga que supera el punto en el cual los desplazamientos se vuelven excesivos para incrementos adicionales de carga. El límite de Davisson se define como la carga en la cual el desplazamiento excede la compresión elástica del pilote [19]. La respuesta carga-movimiento es producto de la resistencia del eje, la cual suele manifestarse como una resistencia última y un punto de falla en la mayoría de los casos. Sin embargo, el acortamiento del pilote en respuesta a la presión ejercida es una relación lineal que no presenta una resistencia última. Esto se debe a que la cima del pilote funciona esencialmente como una zapata que sostiene una columna larga. El concepto de resistencia última se originó a partir de observaciones de zapatas en arcillas, donde la velocidad de carga es lenta, lo que permite que el incremento en la presión de poros se esfume rápidamente [12, 31].

La prueba de celda desarrollada por Osterberg [20] ha permitido observaciones directas de la respuesta por cima de un pilote al aumento de la presión y demostró que la respuesta carga-movimiento de la cima tiene una forma curva suave que se inclina paulatinamente ascendente y descendente sin torceduras ni cambios bruscos. Aunque muchos piensan que el efecto de la carga residual

es marginal y limitado a pilotes en arcilla [19, 21], por lo que es despreciado en el estudio de los ensayos de carga sobre pilotes. La carga residual se puede explicar como introducida por el hincamiento del pilote y por la recuperación (reconsolidación) del terreno por el hincamiento, el término de carga residual en la literatura es llamado carga de movimiento. La carga residual se produce cuando se acumulan fuerzas cortantes en sentido negativo a través de la zona superior del pilote, las cuales se equilibran con las fuerzas cortantes en dirección positiva a través de la zona inferior. En última instancia, la dureza al corte de un pilote está establecida en términos de la tensión efectiva y es cercano a la presión eficaz de sobrecarga [12].

1.10. Carga y asentamiento

En un pilote la presión última se encuentra ubicada en el plano neutral, la presión máxima es el peso muerto más el peso de movimiento (el peso vivo no se incluye). Entonces, la presión máxima del pilote es definida por la resistencia estructural axial del pilote al nivel del plano neutral. El hundimiento causado por los pilotes se debe al aumento de esfuerzos en el terreno a causa de movimientos de tierra, modificaciones en la capa freática, y finalmente por la presión de la edificación de soporte. Las estimaciones de hundimiento necesitan de la posición del plano neutral y del hundimiento del terreno. Los pilotes pueden experimentar consecuencias por aumentos de esfuerzos en el terreno por debajo de la cima del pilote a causa de cargas externas. Lo cual es estudiado utilizando una zapata equivalente que se encuentra en el plano neutral [11].

Los pilotes son elementos utilizados para mover presiones de la cimentación del terreno de poca habilidad de presión hacia niveles más hondos y con una mayor habilidad de carga, cuando el estrato es de un material resistente y comparativamente infranqueable, entonces la mayoría de su habilidad de soporte es dada por la solidez del estrato a la cima de los pilotes, estos tipos de pilotes son conocidos como pilotes de cima. Pero si los pilotes no alcanzan un estrato competente su habilidad de soporte se debe a la presión final y a al rozamiento superficial entre la superficie empotrada del pilote y el terreno adyacente, a los pilotes que su habilidad es por fricción se les conoce como pilotes de fricción [2, 10, 11].

La carga en un pilote se origina a través de la coraza de acero y se transfiere al terreno a través de grandes valores de rozamiento en la interfaz, con pequeños elementos de soporte. En términos de ingeniería, la carga de falla

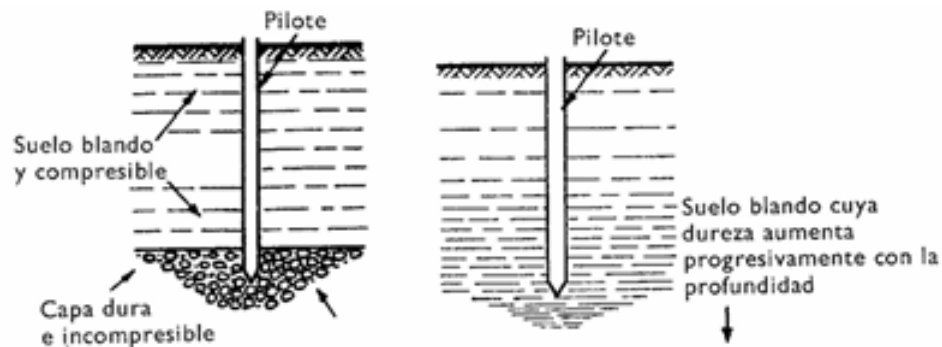


Figura 1.7: (a) Pilote de punta. (b) Pilote de fricción [2].

podría suceder previamente al llegar a la carga final si el hundimiento del armazón supera los valores aceptables. Según Terzaghi, para fines prácticos, la carga terminal es aquella que produce un hundimiento equivalente a un décimo del diámetro del pilote. Sin embargo, para pilotes de diámetros mayores con una componente de margen de seguridad de 2, el hundimiento bajo la presión de trabajo puede ser excesivo. Para estimar las cargas permisibles del pilote, se deben seguir estos pasos: primero, encontrar la cota de la base de los pilotes logrando eludir un hundimiento enorme del conjunto de pilotes; luego, estimar el diámetro de los pilotes de modo que el hundimiento de un pilote individual con una carga no ocurra en un hundimiento desmesurado del conjunto de pilotes; finalmente, se debe analizar la economía al variar el número y los diámetros de los pilotes [2, 10, 11].

Para determinar la habilidad de carga final de un pilote, existen dos enfoques principales: uno basado en la mecánica de suelos y otro en métodos dinámicos. El método de mecánica de suelos permite estimar las cargas permisibles considerando las propiedades del terreno y el tipo de pilote. Sin embargo, este método a menudo proporciona cargas de quiebre mediante un error cercano al 50% de la carga de falla encontrada a través pruebas de carga. En contraste, las fórmulas dinámicas ofrecen una alternativa para estimar cargas permisibles, pero no siempre son aceptadas por ingenieros con experiencia en cimentaciones [11].

1.11. Estudio de asentamientos

En el instante en que examinamos los hundimientos generados por edificaciones sobre pilotes, es crucial considerar la ubicación del plano neutral como factor determinante en el estudio. Independientemente de la propor-

ción de los hundimientos en el plano neutral, el hundimientos en la cabeza del pilote se suma al acortamiento del pilote debido a las presiones (presiones permanentes más presiones de movimiento) por encima del plano neutral. Sin embargo, es importante destacar que la posición del plano neutral no es estática. Al mismo tiempo que el pilote se ve forzado de manera descendente, su penetración neta en el suelo aumenta, lo que a su vez incrementa la resistencia de la cima del pilote. Este aumento en la solidez de la cima del pilote provoca un desplazamiento descendente en el lugar de las fuerzas de equilibrio (plano neutral).

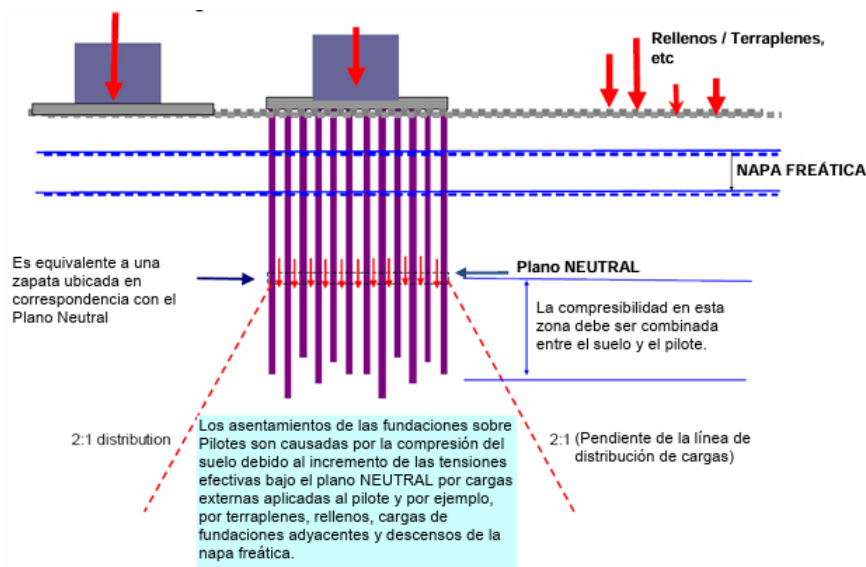


Figura 1.8: Análisis del asentamiento de los micropilotes [12].

El caso principal es cuando la posición definitiva del plano neutral se encuentra en una capa de terreno no compresible, para el cual el hundimiento del terreno es mínimo, la carga de movimiento es de igual forma diminuta y posiblemente insignificante. En cambio, si el hundimiento en el sitio final del plano neutral es considerable, el movimiento decreciente será importante y fundamental para la estructura. En la estimación de los hundimientos no puede realizarse sin una valoración adecuada de la interacción entre la longitud de la zona de transición, la posición del plano neutral y la intensidad de la dureza en la cima en relación con su penetración neta. A su vez, esta penetración neta depende de la dimensión del hundimiento del suelo [11]. El estudio de los hundimientos empieza con el cálculo de la posición de las fuerzas de equilibrio, es decir, el plano neutral. Este estudio presupone la consideración

de factores influyentes, la carga que recibe la fundación de pilotes y otras modificaciones que surgen como consecuencia de a la presión efectiva en el terreno luego de que se complete la edificación de la estructura soportada por los pilotes. Cuando no está claro si existe un estrato de terreno incompresible, El factor determinante para establecer la ubicación de las fuerzas de equilibrio reside en calcular la magnitud de la resistencia en la cima, que está determinada por una función específica de la respuesta de la cima [11]. El hundimiento de la edificación sobre pilotes se estima ser igual al hundimiento medido para una zapata equivalente. Un aspecto crucial del cálculo de hundimientos utilizando aproximaciones por zapatas equivalentes es su habilidad para integrar todos los aspectos externos al conjunto de pilotes. Por ejemplo, las incrementadas cargas en el terreno debido a las presiones sobre el conjunto de pilotes (cabezales de pilotes) pueden hallarse transfiriendo las presiones a una zapata virtual, llamada zapata equivalente, cuya posición está plano neutral y conservando el mismo área de presiones que los cabezales de pilotes. Se asume entonces que el hundimiento de la fundación sobre pilotes es igual al hundimiento medido para la zapata equivalente. La destreza total de un pilote es determinada mediante reducciones empíricas, como un estudio total de esfuerzos. Una ubicación incorrecta del plano neutro puede tener un impacto significativo en las mediciones de hundimiento de los edificios sobre pilotes [11, 12].

1.12. Teoría de expansión de cavidades

El aumento de la presión de poro durante la instalación de pilotes en arcillas blandas saturadas es un tema ampliamente estudiado. Se ha comprobado en campo que durante el hincado existe un aumento de la presión de poro que luego se disipa. La disipación de la presión de poro implica un aumento en los esfuerzos eficaces y por lo tanto un incremento en la resistencia al esfuerzo cortante del suelo [43]. Se emplean ecuaciones específicas para determinar la abundancia de presión de poro en los métodos de expansión de cavidades [44]. La teoría de expansión de cavidades se fundamenta en las variaciones de esfuerzos debidos a la presión de poro y los desplazamientos causados por la expansión de una cavidad cilíndrica. Además, esta teoría se ajusta al estudio de micropilotes inyectados y constituye un instrumento valioso para distinguir los parámetros que influyen en el comportamiento de un micropilote.

1.12.1. Presión de expansión

La determinación de la presión de expansión en una cavidad tubular generada en una situación elasto-plástico se lleva a cabo utilizando los criterios de Tresca y Mohr-Coulomb.

- Criterio de Mohr-Coulomb:

$$P = c'F'_c + P_oF'_q \quad (1.26)$$

Donde c' es la cohesión en términos de esfuerzos efecaces, P_o es el esfuerzo eficaz del terreno y F'_c , F'_q son las variables de expansión de una cavidad tubular y se definen como:

$$F'_q = (1 + \text{sen}\phi)(I_{rr}\text{sec}\phi)^{\frac{\text{sen}\phi}{1+\text{sen}\phi}} \quad F'_c = (F'_q - 1)\text{cot}\phi \quad (1.27)$$

Donde ϕ es el ángulo de rozamiento interna en términos de esfuerzos efectivos, I_{rr} es el índice de dureza reducido [44].

- Tresca:

$$P = c_\mu \left\{ 1 + Ln \left[\frac{G}{c_\mu} \left[1 - \left(\frac{a_o}{a} \right)^2 \right] + \left(\frac{a_o}{a} \right)^2 \right] \right\} + P_o \quad (1.28)$$

Donde c_u es la resistencia cortante no drenada, $G = E/2(1 + \nu)$ es el módulo elástico cortante, a_o es el radio inicial de la cavidad, a es el radio de la cavidad expandida y P_o es la presión inicial [45].

1.12.2. Exceso de presión de poro

El exceso de presión de poro se genera en la pared de la cavidad y disminuye radialmente hasta alcanzar cero en la interfaz elasto-plástica:

$$\Delta u = 2c_\mu Ln \left(\frac{a}{r} \sqrt{\frac{G}{c_\mu}} \right) \quad (1.29)$$

En donde G es el módulo cortante. Si se supone que la condición inicial de esfuerzo p_o es una compresión isotrópica y el suelo está saturado, el exceso de presión de poro en cualquier punto de la zona plástica de una cavidad cilíndrica se calcula como [44]:

$$\Delta u = \left[0,817\alpha + 2Ln \left(\frac{a}{r} \sqrt{\frac{G}{c_\mu}} \right) \right] c_\mu$$

$$\alpha = 0,707(3A - 1) \qquad A = \frac{P_o}{c_\mu} + \frac{1 - \text{sen}\phi}{2\text{sen}\phi} \qquad (1.30)$$

Donde α representa el parámetro de presión de poro de Henkel y se relaciona con el parámetro A de presión de poro de Skempton. Para prever la disipación en el exceso de presión de poro, es necesario tener información sobre la distribución inicial dentro de la zona plástica y el coeficiente de consolidación horizontal. Dado que el diámetro es pequeño, limita la dureza a flexión, por lo que su forma tubular resulta óptima al tener la mayor relación de inercia con respecto a su área.

1.12.3. Modelo elástico

Debido al micropilote, la expansión genera una zona plástica que sufre deformaciones cortantes y, por consiguiente, cambios en la presión de poro. La consolidación alrededor de un micropilote ocurre en dirección horizontal, por lo que el coeficiente de consolidación utilizado debe ser en condiciones horizontales. Por lo tanto:

$$C = \frac{2kG(1 - \nu)}{\gamma(1 - 2\nu)} \qquad (1.31)$$

Donde k es la permeabilidad del suelo, γ es el peso unitario del agua, G es el módulo cortante y ν es la relación de Poisson en términos de esfuerzos efectivos.

Capítulo 2

Aplicaciones de los micropilotes

2.1. Estabilidad en taludes

El refuerzo en los micropilotes es para la estabilidad de taludes, retención de tierras, refuerzo del terreno y reducción de asentamientos. En estabilización de taludes se debe disponer un mínimo de dos micropilotes inclinados, para la estabilidad del talud mediante modelos se supone que el suelo-estructura es una estructura completa, en donde la longitud sobre la superficie de ruptura es dada por la geometría del talud pero no debe superar los 6 o 7 metros, mientras la longitud debajo de la ruptura sea aproximadamente igual a la superior, los micropilotes inclinados deben tener un ángulo entre 20° y 30° . La viabilidad en el uso de micropilotes para taludes son determinados por: 1. Las condiciones del terreno y de perforación son difíciles, 2. El sistema de apoyo está muy cercano a la estructura y 3. El hincado de micropilotes provocarían licuefacción. La capacidad de los micropilotes en una pendiente aumenta debido a su relación de esbeltez (L/d), para refuerzos sísmicos se puede producir licuefacción debido al pandeo por pérdida de apoyo lateral. Se puede establecer si un terreno es potencialmente licuable mediante métodos que implican la evaluación de un factor de seguridad, este factor relaciona la capacidad del terreno para resistir la licuefacción (CRR) y el esfuerzo de corte cíclico inducido por el terremoto (CSR), el CSR se describe como el esfuerzo cortante máximo provocado por el sismo dividido por el esfuerzo efectivo vertical de una columna de terreno [23], para estructuras livianas se recomienda utilizar lo planteado por Liao y Whitman [24]. La estabilización de taludes mediante micropilotes se realiza de dos maneras:

- Que llegen hasta una profundidad por debajo de la superficie de desli-

zamiento, en donde el micropilote se fija al suelo mediante una viga de hormigón.

- Los micropilotes se colocan muy juntos para crear una estructura de micropilotes comportándose como un muro de contención por gravedad, ya que la fuerza de contención se logra mediante la resistencia al deslizamiento, lo que se debe a que el grupo de micropilotes refuerza el suelo.

Por lo anteriormente expuesto la construcción de micropilotes para la estabilización de taludes es popular debido a que es sencilla, además de que es poca la remoción de masa, ahora, los micropilotes se pueden diseñar para soportar grandes cargas golpeándolos, al hacer esto se movilizan fuerzas axiales de contención. El factor de seguridad para la estabilización de taludes oscila entre 1.3 y 1.5. Sabemos que la causa de movimientos en los taludes se debe a precipitaciones que provocan un aumento en el nivel de las aguas subterráneas y de presión de los poros en el talud, el espaciamiento de los micropilotes hace que la presión de poro no sea afectada, es decir que un corte hidráulico en la estructura es despreciable. Generalmete la zona de deslizamiento crítica se encuentra en la interfaz de suelo a roca competente, ya que se pueden encontrar aguas estancadas, esto hace que la zona se sature y se reblandezca. Por otro lado las fuerzas desestabilizadoras debido a las aceleraciones inducidas por sismos deben ser consideradas siempre, lo que se hace mediante una análisis seudoestático [24, 25].

Si fuese el caso de un material arcilloso el límite de Atterberg nos sirve para hallar el ángulo de fricción de drenado [26] permitiendo un mejor análisis para la estabilidad de taludes, por lo tanto el micropilote debe proporcionar la fuerza necesaria para estabilizar el talud a través de fuerzas axiales desarrolladas en la interfaz lechada-suelo.

Los estudios demuestran que colocar los micropilotes en proximidades de la mitad del talud son más óptimos, ya que la parte por encima de la zona de deslizamiento se encuentra a tensión y la parte inferior a compresión, es decir que la capacidad de resistencia del micropilote por debajo de la zona de deslizamiento debe ser suficiente para resistir las fuerzas axiales generadas por dicha zona. De acuerdo a lo anterior la capacidad de resistencia lateral del micropilote por debajo de la superficie de deslizamiento debe ser suficiente para resistir y garantiza que el micropilote no sea extraído, la cual se calcula como:

$$P_{ultima} = \pi\alpha dL \quad (2.1)$$

Donde α es la resistencia lechada-suelo encima de la zona de deslizamiento, L la longitud del micropilote de la zona por debajo de la zona de deslizamiento y d es el diámetro del micropilote, no podemos olvidar la resistencia a flexión debido a la fuerza desequilibrada del talud (ocasionada por la pendiente), es por tal motivo que a la longitud por debajo de la zona de deslizamiento se halla con un FS de 2. El análisis de corte de un micropilote se hace analizando la porción por encima y por debajo de la zona de deslizamiento mediante curvas p-y (tensiones vs desplazamientos relativos).

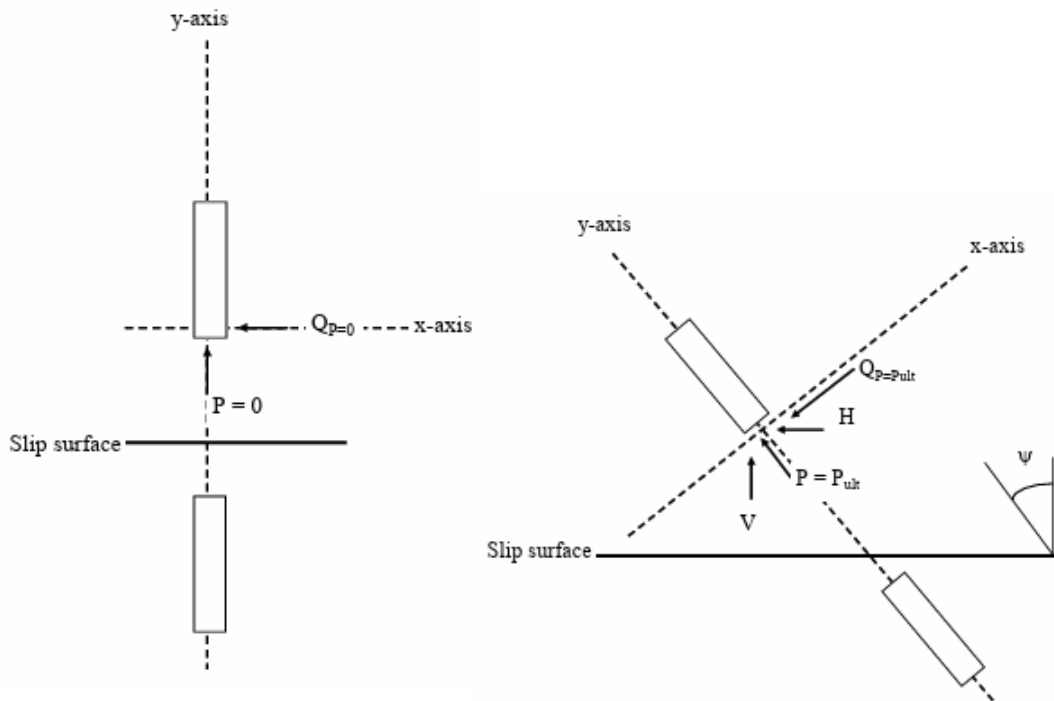


Figura 2.1: Fuerzas verticales y horizontales en un talud [2].

Como es bien sabido la superficie de deslizamiento forma un ángulo Ψ lo que hace que la fuerza axial y cortantes sean:

$$\begin{aligned}
 P &= V \cos \Psi + H \sin \Psi & Q &= -V \sin \Psi + H \cos \Psi \\
 \text{encontrando } H &= Q \cos \Psi + P \sin \Psi
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

En donde H es la fuerza lateral sobre el micropilote, trabajos realizados muestran que $\Psi \approx 30^\circ$ [27]. El flujo plástico sucede cuando los micropilotes están muy separados y/o el suelo sobre la superficie de deslizamiento es muy

débil, lo que hace que el suelo se mueva entre micropilotes adyacentes [28] pero se puede calcular la fuerza lateral como [29]:

$$q = Ac \left[\frac{B - 2E - 1}{N_\Psi \tan \Psi} + F \right] - C_1(F - 2)D_2 N_\Psi^{\frac{1}{2}} + \frac{\gamma \bar{z}}{N_\Psi} (AB - D) \quad (2.3)$$

En donde c es la cohesión del suelo, γ es el peso específico, \bar{z} es la profundidad del micropilote, Ψ es el ángulo de fricción, D_1 es la separación centro a centro entre micropilotes y D_2 es la separación entre bordes de micropilotes, los términos N_Ψ , A , E , F y B son:

$$A = D_1 \left[\frac{D_1}{D_2} \right]^{\sqrt{N_\Psi \tan \Psi} + N_\Psi - 1} \quad F = \frac{2 \tan \Psi + 2\sqrt{N_\Psi} + N_\Psi^{-\frac{1}{2}}}{E + N_\Psi - 1}$$

$$B = e^{\frac{D_1 - D_2}{D_1} N_\Psi \tan N_\Psi \tan(\frac{\pi}{8} + \frac{\Psi}{4})} \quad E = \sqrt{N_\Psi} \tan \Psi$$

$$N_\Psi = \tan^2 \left[\frac{\pi}{4} + \frac{\Psi}{4} \right] \quad (2.4)$$

2.2. Paraguas en túneles

Los micropilotes en túneles se usan para obtener una superficie troncocónica, cilíndrica o de semiángulo. Generalmente se usan como presostentamiento al avanzar en zonas débiles, con lo que se mejora la capacidad resistente, se ejecutan en un solo tramo donde la longitud no supera los 25 metros y con inclinaciones menores a 15° , en cuanto a su separación entre ejes continuos debe ser menor a 60 centímetros. La longitud del micropilote considerado como vigas L_d se calcula como:

$$L_d = L_a + L_f + 1,2L_e \quad (2.5)$$

En donde L_a es la longitud de excavación, L_f es la longitud del frente de excavación y L_e es la longitud elástica del micropilote [10].

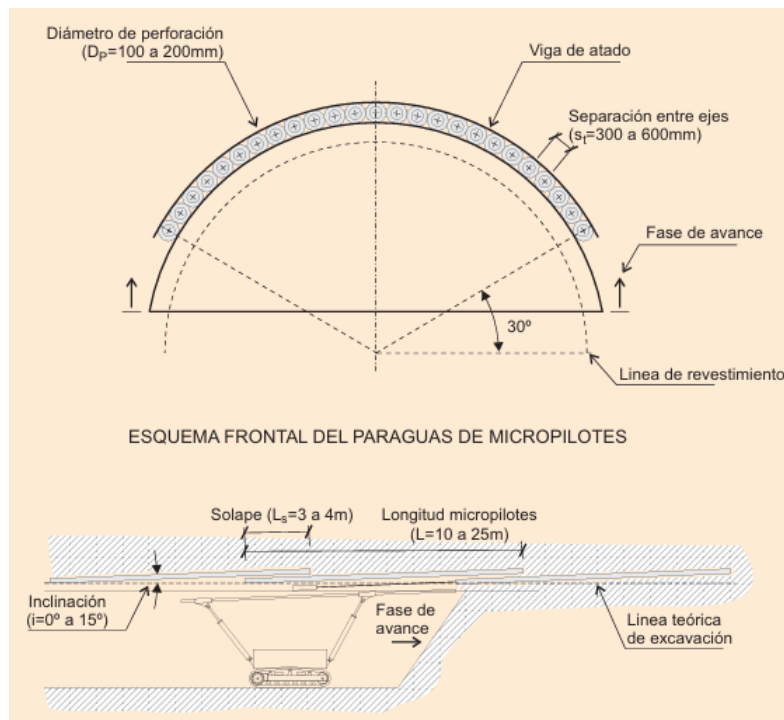


Figura 2.2: Ejecución de micropilote en túneles[10].

2.3. Micropilotes en cimentaciones de estructuras

Los micropilotes pueden ser utilizados en estructuras nuevas o existentes, en estructuras existentes proporcionan una conexión directa con los estratos sin necesidad de nuevos encrepados y refuerzos a la estructura interna. Para una zona industrial o residencial los micropilotes son una solución rentable, lo principal es evaluar los costes en términos de la capacidad axial, entre ellos están: Apuntalamiento y relleno, control de erosión, desagüe y mejora del terreno. Los micropilotes en su tramo superior son reforzados con acero, una barra central y la unión inferior con barra de refuerzo, mientras que el diseño es gobernado por la resistencia lateral y la de la base. Los tipos de cimentaciones pueden ser en forma de losa con o sin mejora del terreno, o profundos formado por pilotes hincados, el uso de zapatas son consideradas en cualquier selección de fundaciones, mientras que las zapatas extendidas son generalmente más económicas que las profundas. Cuando la zapata profunda es más adecuada los micropilotes deben compararse con pilotes hincados y

ejes perforados, sin embargo los pozos son más rentables que los micropilotes, por lo que el uso de micropilotes es para proyectos con limitaciones técnicas, como por ejemplo: Espacios limitado para construcciones profundas, la existencia de varios tipos de subsuelos, en el caso de apuntalamiento se requiere de control de vibraciones o asentamientos [2].

Para el diseño de micropilotes para cimentaciones en estructuras se utiliza el método de tapa rígida, en el cual se pueden utilizar fuerzas axiales donde se supone que la tapa de la base es rígida, es decir, puede girar libremente en todos los ejes pero no se dobla, pero cuando el grupo de micropilotes es grande se requiere de un análisis suelo-estructura más sofisticado. La separación centro-centro entre micropilotes individuales debe ser al menos de 760 mm o 3 veces el diámetro del micropilote (el que sea mayor), este criterio disminuye los impactos de grupo entre micropilotes contiguos.

La longitud de un micropilote está determinada para que cumpla las capacidades geotécnicas por fricción superficial, además, está controlada para que resiste las fuerzas de elevación y la resistencia de descenso, en general es preferible instalar menos micropilotes de mayor capacidad en comparación con uno más grande, ya que a mayor número de micropilotes es más eficiente resistir las cargas laterales y minimizar las deflexiones laterales, la carga de compresión para la longitud de un micropilote es:

$$P = 0,4Af' + 0,47F_{acero}(A_{acero} + A_{revestimiento}) \quad (2.6)$$

2.3.1. Placa de cimentación

El enfoque del diseño de placas pilotadas radica en garantizar una distribución uniforme de las tensiones de contacto a lo largo de la placa. Estas placas están concebidas para que los pilotes actúen como elementos de refuerzo del suelo, reduciendo los asentamientos y soportando las cargas concentradas que inevitablemente recibe la placa. La distribución de las tensiones uniformes de contacto a través de la placa se determina según la magnitud de las cargas concentradas, y el diseño decide la distancia y el número de pilotes necesarios para soportar dichas cargas, dándoles a los pilotes un factor de seguridad unitario. El término placas-pilote se refiere a una fundación de pilotes elaborada con un factor de seguridad cercano a la unidad para los pilotes, o más específicamente, donde el plano neutro se encuentra posicionado en concordancia con la superficie inferior de la placa. Las tensiones de contacto solo surgirán si las cargas externas igualan o superan la capacidad combinada de los pilotes. [11].

Capítulo 3

Actualidad en micropilotes

3.1. Metodologías

3.1.1. Pruebas de carga

Los diferentes métodos de pruebas de carga se han distinguido por el tiempo durante la cual se aplica la fuerza. Mientras que los experimentos de carga estática emplean fuerzas en el transcurso de períodos de tiempo prolongados para analizar la habilidad soportante del micropilote, los ensayos de carga dinámica y de carga rápida aplican fuerzas de magnitud comparable en un lapso más breve [33, 34]. Los siguientes tipos de carga son:

- Prueba de carga estática:
El ensayo de carga estática es la técnica que emula optimamente la conducta real del micropilote sometido a carga. Los ensayos de carga estática son capaces de ser efectuadas a lo largo de la fase de diseño o mientras se realiza la construcción. Esta prueba incluye el ensayo de compresión axial, la prueba a tracción y el de carga lateral. En estas pruebas, la carga suele aplicarse gradualmente en incrementos moderados y se anota el desplazamiento del micropilote.
- Prueba de carga dinámica:
Las pruebas de carga dinámicas emplean los pasos de cambio de forma y aceleración efectuadas próximas de la cabeza del micropilote cuando una percusión es aplicada mediante un martillo para hincar. Los datos dinámicos pueden ser usadas para evaluar la resistencia del terreno que

se mueven bajo condiciones de carga estática. Los ensayos dinámicos in situ son cada vez más empleados para predecir la resistencia estática del suelo y el comportamiento carga-asiento. El método de ensayo es similar al usado en pilotes hincados.

- Prueba de carga bidireccional:
La prueba de carga estática es un método alternativo para la evaluación de la capacidad del micropilote es la prueba de carga bidireccional (conocida por el nombre comercial de célula Osterberg). Esta prueba nos permite de manera simple y eficiente llevar a cabo un ensayo de carga estática en una cimentación profunda. La célula Osterberg es una célula de carga colocada en la punta o en el fuste del micropilote dentro de la perforación durante la operación de hormigonado [33]. En la prueba de carga bidireccional la carga es aplicada en la punta del micropilote o cerca de ella, cuando la célula se expande, la resistencia en punta provee la reacción necesaria a la resistencia por fuste, y viceversa. El ensayo se completa cuando la última resistencia en fuste o en punta es alcanzada.

- Prueba de carga rápida:
Los ensayos de carga rápida usan un cilindro de combustión interna con unos contrapesos de reacción o una maza de caída libre sobre sistemas de amortiguación. La medida de la carga aplicada se realiza mediante células de carga, y la medida del desplazamiento de la cabeza del micropilote mediante acelerómetros y niveles ópticos especiales. En este ensayo, la longitud de la onda de compresión es suficientemente larga para abarcar la totalidad del micropilote y, por tanto, no es necesario un análisis de ecuación de onda [33].

3.1.2. Instrumentación geotécnica

En la actualidad el monitoreo se hace mediante dos técnicas, que son:

- Inclinómetro
El Inclinómetro es una sonda suspendida de un cable que en el otro extremo tiene un dispositivo de lectura, la sonda tiene dos acelerómetros con sus ejes orientados a 90° con una distancia de 0.5 m. El análisis se hace mediante el cálculo de la desviación de las ruedas superiores en relación a la horizontal y las ruedas inferiores producen la inclinación en el intervalo de lectura L, en cada posición del inclinómetro las dos

lecturas tomadas en cada eje se restan uno de otro dejando un $\text{sen}\phi$ y se multiplica por L dando la deflexión horizontal, el resultado final es un gráfico de la desviación horizontal, permitiendo ver en cualquier profundidad el movimiento.

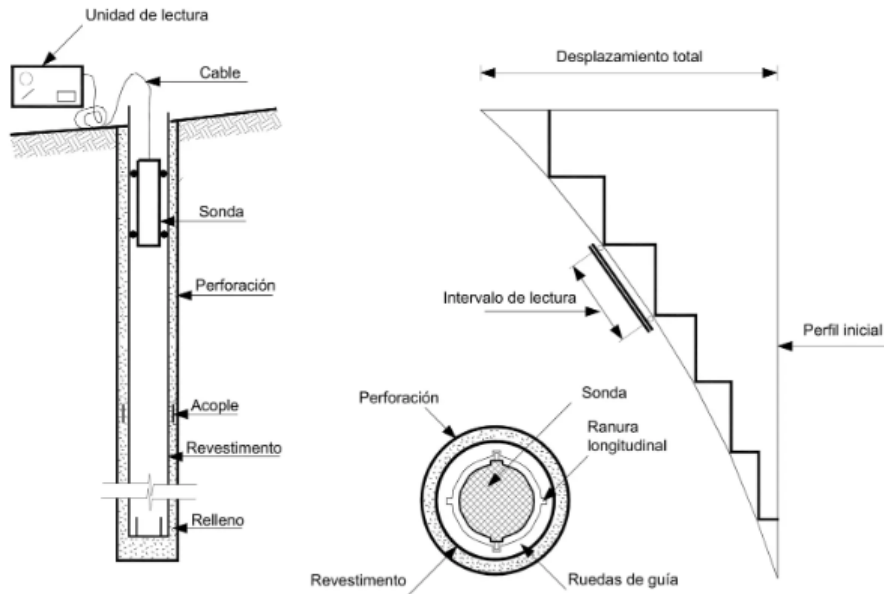


Figura 3.1: Esquema de un inclinómetro [34].

- Extensómetro

El extensómetro permite encontrar los movimientos superficiales totales del terreno, el cual es habitual en el control de desplazamiento vertical. El cual consiste de anclar varillas a profundidades predeterminadas y se lleva hasta la superficie acoplando los tramos. La variación de la distancia entre la cabeza de la varilla y el punto de medida informa del movimiento del terreno, el rango de utilización es entre 2 y 40 m.

Las células de carga son para medir las tensiones actuantes sobre la estructura, dentro de las que tenemos: Célula de diafragma, en donde la carga actuante incide en una membrana flexible que tiene un sistema de cuerda vibrante permitiendo medir su deformación y la célula hidráulica, en esta la carga actúa en una membrana flexible que transmite la presión a un volumen de agua, permitiendo medir la presión resultante.

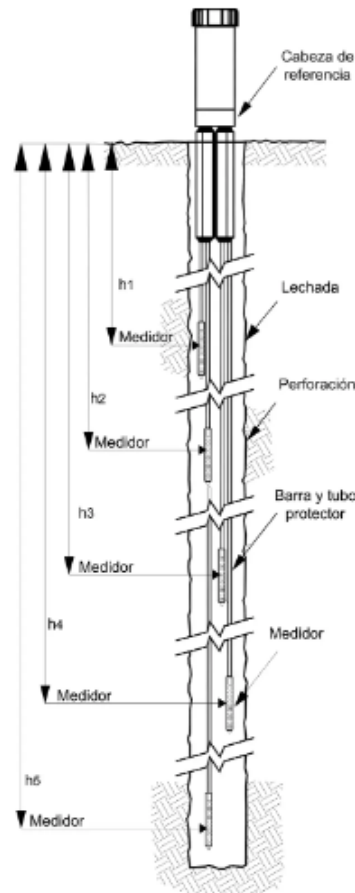


Figura 3.2: Esquema de un extensómetro [35].

3.1.3. Modelado numérico

El modelado numérico de micropilotes implica el uso de métodos computacionales para simular el comportamiento de micropilotes en diferentes condiciones geotécnicas. En el contexto de la geotecnia y la ingeniería civil, el modelado numérico se utiliza para prever cómo responderán los micropilotes bajo diversas cargas y condiciones del suelo. Este enfoque ayuda a los ingenieros a diseñar de manera eficiente y segura proyectos que involucren micropilotes. Algunos enfoques comunes de modelado numérico incluyen:

- Método de Elementos Finitos (FEM): El cual mediante la subdivisión de un dominio en elementos más pequeños o finitos permite resolver problemas, estos elementos se conectan en nodos, formando una malla

que representa la geometría del problema, el FEM se utiliza comúnmente para analizar el comportamiento de estructuras y materiales bajo diferentes condiciones.

- Método de Elementos Discretos (DEM): Se utiliza para simular el comportamiento de sistemas granulares y discontinuos. Este método modela materiales compuestos por partículas individuales que interactúan entre sí a través de fuerzas definidas, las partículas individuales se consideran como elementos discretos, y sus interacciones se describen mediante reglas específicas que pueden incluir fuerzas de contacto, fricción, cohesión, entre otras.

Algunos software de modelado numérico ampliamente utilizados para este propósito incluyen Plaxis, Abaqus y FLAC, entre otros. Estas herramientas permiten a los ingenieros realizar análisis detallados que consideran factores como la resistencia del suelo, las cargas aplicadas y la interacción entre los micropilotes y el suelo circundante.

3.1.4. Ensayo de integridad y calidad

Actualmente para tener una mejor integridad y calidad se usa la tomografía de refracción sísmica, en donde la refracción sísmica permite la determinación de las características geotécnicas del terreno, el análisis de microtremores es una técnica empleada en geofísica, es una forma más modesta y ligera para la adquisición del perfil estratificado dando una alternativa para la determinación de las ondas S. El proceso de refracción sísmica combina la refracción convencional y técnicas de inversión de los viajes de tiempo de la señal sísmica, denominada Wet Inversión y Wet Tomography [37] proporcionando imágenes bidimensionales de la propagación de las velocidades de las ondas primarias del subsuelo, mientras que el método de investigación de microtremores es empleada para obtener los perfiles verticales de la velocidad de la onda, esto permite examinar cómo responde el terreno ante cargas verticales y de cizalla. Los modos de vibración que se producen están determinados por las propiedades mecánicas de las capas subsuperficiales que abarcan desde la superficie hasta los primeros 50 a 100 metros de profundidad.

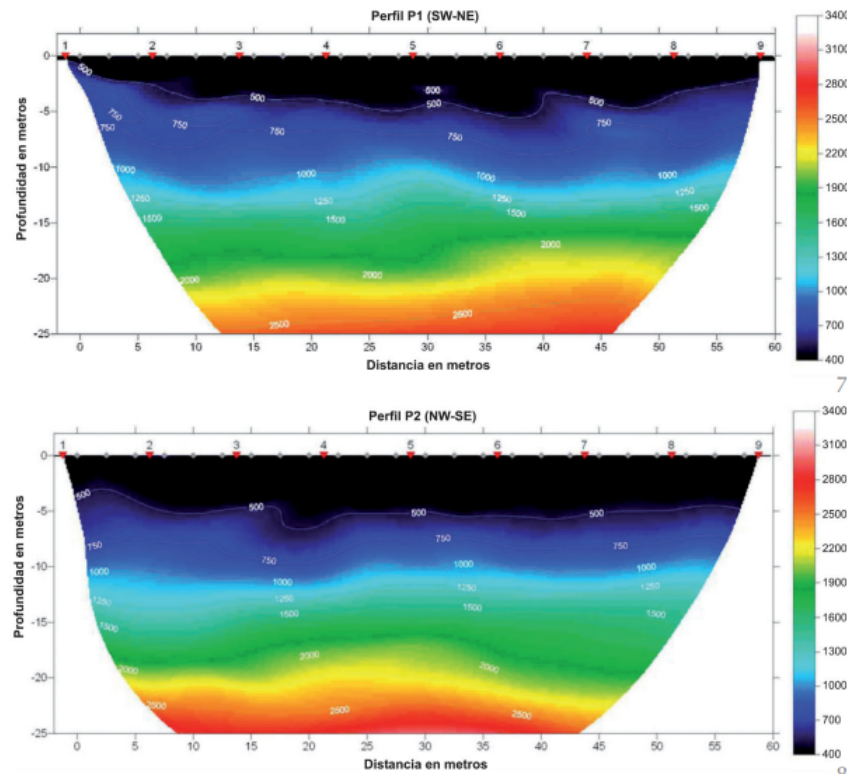


Figura 3.3: Ejemplo de tomografía sísmica [38].

3.2. Avances

3.2.1. Materiales mejorados

Para mejorar la vida útil de los micropilotes, se han desarrollado diversos materiales y técnicas. Algunas opciones incluyen:

- Acero de alta resistencia: Utilizar acero de alta resistencia en la fabricación de los micropilotes puede mejorar su capacidad de carga y resistencia a la corrosión.
- Se ha comprobado que el funcionamiento del micropile se mejora notablemente mediante el efecto de recubrimiento [39]. Podemos encontrar los siguientes recubrimientos: 1. Revestimientos de polímeros, se puede utilizar el epoxi o poliuretano, los cuales son conocidos por su resistencia a la corrosión y durabilidad. 2. Galvanizado, la galvanización es

un proceso que implica recubrir el micropilote con una capa de zinc para protegerlo contra la corrosión. 3. Pinturas anticorrosivas, se aplican pinturas específicas con propiedades anticorrosivas para proteger la superficie del micropilote. 4. Revestimientos de mortero, capas de mortero especializado pueden aplicarse para proteger el micropilote contra la corrosión y otros daños.

- Geotextiles y geomembranas: Incorporar geotextiles o geomembranas en la zona de instalación puede proteger los micropilotes de agentes externos, como la humedad y sustancias corrosivas presentes en el suelo.

3.2.2. Tecnología de perforación

Un avance en la tecnología de perforación se encuentra el martillo hidráulico, que utiliza la presión del fluido hidráulico para generar impactos o golpes en la cabeza del martillo. Este impacto se transmite a través de una barra de perforación al terreno, permitiendo la excavación y perforación del terreno. Las ventajas de la tecnología de perforación con martillo hidráulico para micropilotes incluyen la capacidad de perforar suelos duros o rocosos de manera eficiente, así como la posibilidad de realizar perforaciones más profundas. Además, este método puede ser menos invasivo en comparación con otras técnicas de perforación, lo que puede ser beneficioso en entornos urbanos o sensibles.

3.2.3. Diseño sísmico

Sabemos que los micropilotes están sometidos a presiones laterales estáticas y dinámicas, en las presiones dinámicas los sismos son los más agresivos e importantes de considerar. Durante un sismo, las ondas de corte del terreno se propagan desde las capas más profundas hasta la superficie, lo que provoca vibraciones en la estructura y, por ende, la imposición de cargas inerciales en el micropilote debido al terreno y a la propia estructura. Estas cargas cinemáticas se originan porque las capas más profundas del estrato son más duras y densas debido a procesos geológicos de consolidación y compactación. Este fenómeno ocurre en ciclos de esfuerzos de corte procedentes de las capas inferiores más duras, ocasionando vibraciones en las capas superiores, que son más flexibles. Como consecuencia, el desplazamiento del terreno en esta situación ocasiona esfuerzos y alteraciones en los micropilotes existentes, induciendo curvaturas que pueden provocar roturas por flexión. El análisis para carga lateral estática se hace mediante:

- Modelo Winkler Spring
El pilote es modelado como una columna soportada por una serie de resortes independientes, lo que permite la curva esfuerzo vs deformación de los distintos estratos de suelo y realizar un análisis no-lineal.

- Modelo elástico
En este enfoque se considera que el micropilote está incrustado dentro de un estrato de suelo elástico y continuo, en donde se puede conocer los esfuerzos y alteraciones, permitiendo que este modelo sea adecuado para el análisis de un grupo de micropilotes.

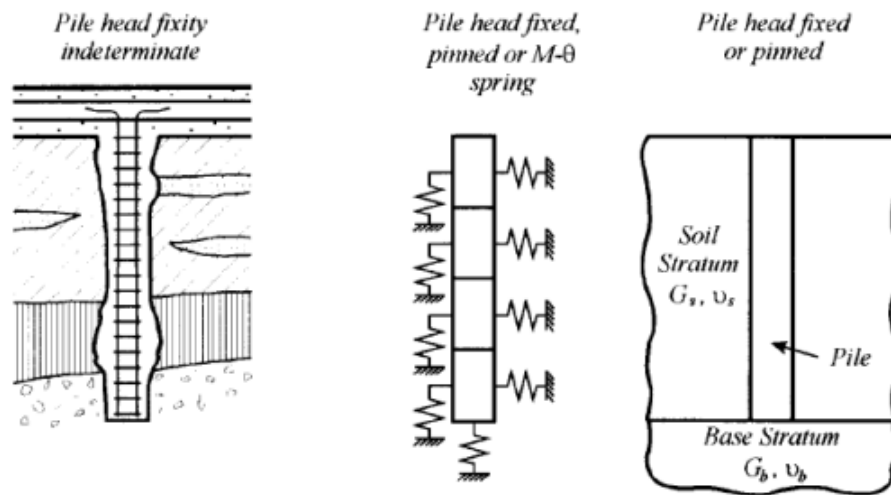


Figura 3.4: Modelo de rigidez del suelo en su estado natural, en el modelo de Winkler Spring y en el modelo elástico [36].

3.3. Formas constructivas

3.3.1. Perforación con barrena continua

El procedimiento comienza con la inserción de la barrena continua en el suelo, girándola para perforar y crear un agujero. A medida que avanza la

perforación, el suelo se extrae continuamente a través del vástago de la barrena. Este método es eficiente para atravesar suelos cohesivos y granulares, ya que la acción rotativa facilita la perforación y la extracción simultánea del material. Los micropilotes instalados mediante perforación con barrena continua son utilizados comúnmente en proyectos de construcción, estabilización de taludes, reforzamiento de cimientos y otras aplicaciones geotécnicas donde se requiere una solución de cimentación especializada. Este método permite la instalación rápida y precisa de micropilotes, minimizando los disturbios en el sitio y mejorando la capacidad de carga del suelo.

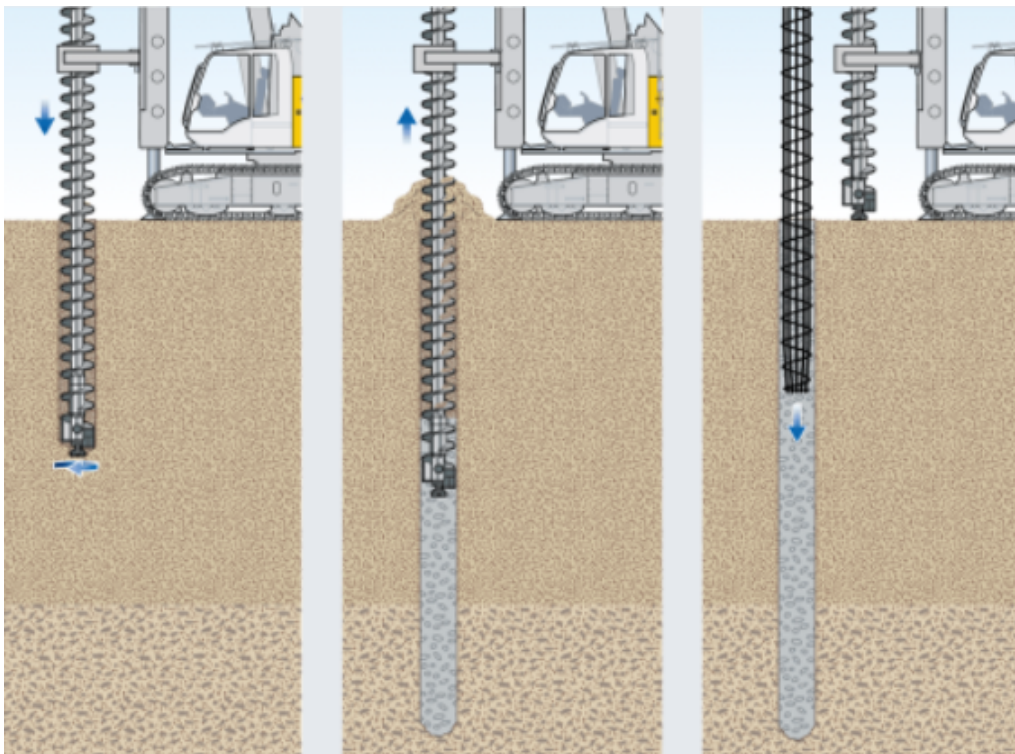


Figura 3.5: Esquema de inserción con barrena continua.

3.3.2. Hélice continua

El método CFA (Continuous Flight Auger) consiste en la instalación in situ de pilotes mediante una barrena helicoidal continua. Se perfora el terreno utilizando esta barrena, mientras se bombea concreto a través del centro de la herramienta hueca, la cual se retira del terreno simultáneamente. La velocidad de rotación y penetración se controla electrónicamente para cada

longitud específica de pilote, asegurando el flujo adecuado de concreto y evitando la descompresión del suelo circundante. El principio fundamental de un pilote CFA encamisado implica una hélice continua combinada con una camisa externa que perfora simultáneamente en direcciones opuestas hasta alcanzar la profundidad requerida. El suelo es transportado hacia arriba por las alas de la barrena rodeadas por la camisa, y se expulsa a través de aberturas en la parte superior de esta. Una vez que se alcanza la profundidad final, se activa la bomba de hormigón y se bombea el hormigón a través del vástago hueco de la hélice.

3.3.3. Jet Grouting

El recalce de cimentaciones mediante inyecciones es un método utilizado cuando no es necesario alterar los elementos estructurales de la cimentación. En lugar de cambiar la cimentación para reducir la carga que el terreno debe soportar, se opta por renovar el terreno. Esto implica incrementar la solidez del terreno mediante la introducción de una mezcla de cemento o diferentes productos estabilizadores [39]. El Jet Grouting es una técnica de mejora de las características del terreno que surgió y se desarrolló en Japón cerca de los años 70 y sigue siendo objeto de innovación continua. El cual se clasifica como una técnica de inyección de una lechada de agente cementante que aumenta las propiedades del terreno, sin depender de la granulometría del terreno para su aplicación. Contrario a otros métodos de inyección, el Jet Grouting usa un chorro de gran rapidez como energía de degradación para fracturar la estructura del terreno, mientras introduce y combina una lechada con el terreno, creando así una mezcla nueva con características físicas mejoradas. Como resultado, el Jet Grouting mejora la capacidad del terreno para soportar cargas y reduce los problemas de asentamiento debido a la consolidación del terreno. Existen cuatro sistemas tradicionales de Jet Grouting:

- Monofluido
La inyección de lechada de cemento es bombeada por el varillaje y sale por la tobera horizontal del monitor con una gran rapidez.

- Doble fluido
Un varillaje interno de dos fases es empleado para separar la provisión de agua y lechada de cemento a dos toberas desplazadas verticalmente del terreno.

- Triple fluido

La lechada, aire y agua son inyectadas por medio de diferentes líneas al monitor inferior.

- Super Jet

Esta técnica usa la base de un método de doble fluido (aire-lechada), utilizando un controlador extremadamente refinado, diseñado para dirigir de una forma detallada la energía del material inyectado. La lechada es utilizada para deteriorar y combinarse con el terreno [40].

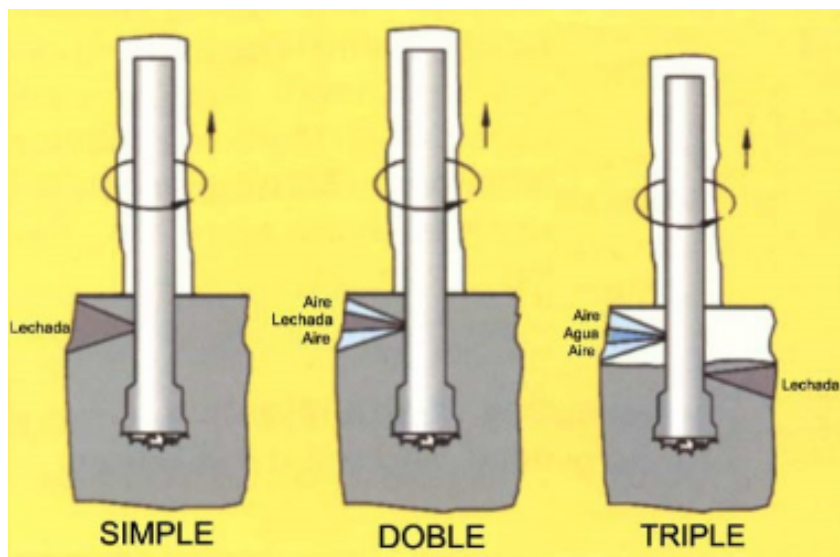


Figura 3.6: *Sistemas de Jet Grouting.*

3.4. Estabilización de taludes

El afianzamiento de taludes mediante el bordado de terreno (soil nail) consiste en colocar o incorporar en el terreno instalaciones metálicas lineales capaces de sostener las fuerzas tensionales, fuerzas cortantes y momentos flectores dentro de un terreno existente o posible de deslizamiento. Son usados para retener dos modos distintos de movimientos o desplazamientos del terreno, el primer caso se refiere a superficies inestables que presentan movimientos insignificantes o nulos, pero con un coeficiente de estabilidad en la

superficie de deslizamiento muy bajo. Por otro lado, el segundo caso describe movimientos progresivos en taludes, donde los desplazamientos son incompatibles con la condición de estabilidad preestablecida. En esta situación, la parte superior del movimiento se encuentra separada de la zona inferior, que es más estable, por una zona más delgada y bien definida. Para reforzar taludes, los micropilotes de cosido del terreno suelen instalarse como una malla de densidad más o menos uniforme a lo largo de la zona inestable, existen dos tipos:

- Tipo 1: Micropilote no reticulado, han sido utilizados como refuerzos in situ en donde las inclusiones de refuerzo son instaladas en perforaciones en el terreno y selladas mediante una lechada, estos fueron proyectados como un armazón estructural de retención para resistir deslizamientos del suelo en el plano cortante o de falla. Fueron pensados para actuar como un travesaño o viga, la cual permite que encima de la superficie de deslizamiento actúe como una carga vertical de tierra, actuando sobre las presiones internas de la estructura del suelo debajo de la superficie de deslizamiento, aumentando la fricción y cohesión en dicho plano. En algunos casos una densidad alta puede inducir una interacción con el suelo en donde los micropilotes conforman una pila de suelo reforzado.
- Tipo 2: Redes reticuladas de micropilotes, conforman una estructura de gravedad de suelo coherente, compacto y reforzado, esta estructura depende del efecto de trabajo en caja que produce y que resulta en un incremento de la cohesión aparente y de la rigidez suelo-micropilote. La zona de deslizamiento es reforzada con un espaciamiento cerrado de un sistema de micropilotes tridimensionales cruzando la superficie de deslizamiento [42].

3.4.1. Micropilote combinado con el método de vigas acopladas

La construcción mediante micropilotes cambia el nivel de la roca circundante en el túnel y reduce la altura del arco del suelo, ya que dicho proceso redistribuye tensiones en donde el suelo se comprime y se compacta. El diseño considero micropilotes con diámetro de 150 mm con 4 barras de acero de 32 mm en forma que quincunx, la distancia entre micropilotes es de 0.8 m y la distancia centro a centro es de 0.6 m. Los resultados mostrarón que después de la excavación del túnel el suelo se consolido y disminuyo la deformación del suelo, lo que es debido a que la tensión se ha redistribuido, entonces, la tensión del suelo circundante se ha redistribuido durante el proceso de refuerzo del suelo por lo que la excavación del túnel debe realizarse una vez

consolidado el suelo, el asentamiento se debe a que la capa de suelo es una estructura suelta y no puede formar un arco de suelo eficiente.



Figura 3.7: Esquema de micropilote combinado con el método de vigas acopladas [55].

3.4.2. Micropilotes en presas de control

En las presas de control el reducir el esfuerzo de construcción es fundamental, por lo que se da la viabilidad de un grupo de micropilotes en donde su cabezas están desconectadas del cuerpo de la presa, a esto se le denomina grupo de micropilotes de cabeza separada HMG, debido a su conexión rígida a un cuerpo estructural se reduce la capacidad para soportar fuerzas transversales, en el proceso constructivo se le aplica una capa de grava, aunque la grava reduce las fuerzas transversales aplicadas a las cabezas de los micropilotes el desplazamiento del cuerpo de la presa puede ser mayor que en una conexión rígida. Para la simulación se utilizó el modelo de suelo de endurecimiento elastoplástico HS basado en el modelo de Mohr -Coulomb, el modelo consta de una viga con una interfaz integrada para describir la interacción con el suelo, la interacción del micropilote con el recubrimiento es considerado como un comportamiento elástico lineal, mientras que la capacidad portante es una función del diámetro del micropilote. Según Broms [56] los pilotes sometidos a cargas laterales pueden fallar por acoplamiento de suelo-pilote o por falla estructural, los resultados mostraron que los micropilotes en el lado frontal se comprimieron y alcanzaron su carga de pandeo en

el caso de excentricidad de la carga, además de que en una cimentación rígida su carga de pandeo es menor a la de un grupo de micropilotes conectados rígidamente, lo que se interpreta en que la base del grupo de micropilotes rígidamente conectados pueden fallar debido a su fragilidad ya que la superficie se encuentra fuera de la base dando una mayor capacidad para soportar cargas por pandeo.

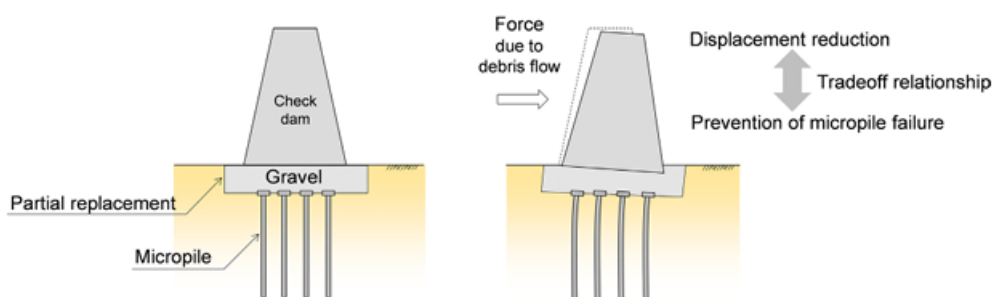


Figura 3.8: Esquema de micropilote en presas de control [57].

3.4.3. Micropilotes en control de vibraciones

El aislar las vibraciones ocasionadas por máquinas es uno de los problemas más importantes en las cimentaciones, entre los métodos de aislamiento de vibraciones el más común es el uso de zanjas, pero no son efectivos contra vibraciones de longitudes de onda larga lo cual se debe a la limitación de la profundidad. Un estudio reciente realiza un muro de micropilotes secantes inclinados como barrera antivibración, encontrando que al aumentar la longitud del micropilote aumenta la eficiencia, estos resultados son respaldados por Celebi et al [67] y que existe una relación entre la inclinación del micropilote y la distancia de la fuente, en donde se notó que a mayor inclinación mayor era la eficiencia. Para terminar, se encontró que el muro de micropilotes secantes era menos eficiente que el de una zanja abierta pero son más efectivos que los micropilotes verticales.

3.4.4. Estabilización en vías férreas

El transporte pesado es utilizado en muchos países los cuales son sometidos a tiempos largos de servicio y últimamente a la creciente carga por eje, lo anterior hace que sea necesario mantener los asentamientos en los terraplenes. La baja rigidez del lecho de la vía provoca deflexiones de los

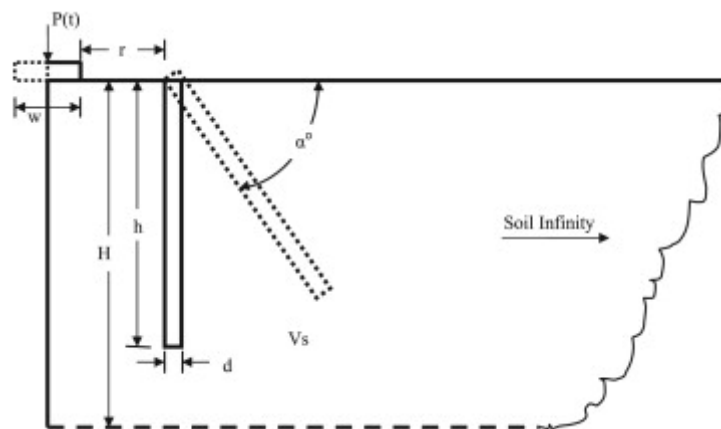


Figura 3.9: Esquema del sistema de aislamiento de vibraciones [68].

rieles, asentamiento, deterioro en la calidad de la vía y por ende reducción de la confiabilidad, por su facilidad, bajas perturbaciones y su control eficaz de asentamientos los micropilotes han sido optados como refuerzo de terraplenes ferroviarios. Es importante recordar que las cargas de trenes de transporte pesado tienen baja frecuencia, alta amplitud y una duración larga, lo que hace que los problemas de asentamientos en los terraplenes sean más prominentes.

Un primer trabajo [69] muestra que el impacto del espaciamiento es más significativo que la longitud, además de que el espaciamiento adecuado de los micropilotes no debe ser mayor a cinco veces el diámetro del pilote y que si el micropilote es pequeño tiende a flotar en el terraplén, lo que se ve reflejado en que los micropilotes no ejerzan un efecto de protección, finalmente se encontró que el desplazamiento de la superficie del terraplén disminuye con el aumento de la longitud del micropilote. Un segundo trabajo [70] realizó su estudio con micropilotes con tramos helicoidales instalados dentro de las traviesas encontrando que la calidad y rigidez de la plataforma mejoran entre un 20% y 30% después de la estabilización con micropilotes, pero la eficacia del sistema de micropilotes depende de las condiciones del lastre y las subcapas, donde una mayor rigidez de estos elementos ayuda en una mejora adicional de la calidad de la vía.

3.5. Micropilotes de energía

El desarrollo de los micropilotes de energía es una tecnología innovadora de geoestructura energética para la explotación de energía geotérmica de baja entalpia. Esta innovación se debe a la creciente demanda energética mundial llevando a una acelerada investigación en energías renovables, en donde el intercambio de calor geotérmico ayuda a la reducción de CO₂. El calor contenido en las capas superiores terrestres representa una forma de energía renovable conocida como energía geotérmica de baja entalpia LEGE, los sistemas de bombas de calor de fuente terrestre usan tuberías de plástico enterrada en el suelo, por la cual circula un fluido que facilita la transferencia de calor con el suelo adyacente y otra tubería que permite intercambiar el calor con el edificio. Los primeros trabajos fueron realizados por Laloui [49] y Bourne-Webb [50] permitiendo el auge de los micropilotes de energía. En la construcción de micropilotes de energía en la punta tienen un tanque de acero (aproximadamente 6 lit) que está conectado en serie a la tubería de plástico formando un circuito en U.

Los micropilotes de energía sostienen los edificios mientras actúan como un intercambiador de calor utilizando tubos de polietileno de alta densidad, la temperatura se regula con una bomba de calor dentro del edificio, durante los procesos de calentamiento y enfriamiento las pilas se contraen y se expanden lo que puede verse restringido por la interacción pila-suelo. Las pruebas de respuesta térmica TRT se utilizan para estimar las propiedades térmicas de la pila, además de que nos dan las respuestas termomecánicas. Ahora los cambios de temperatura ocasionan deformaciones que pueden causar tensiones axiales afectando la solidez al corte de la interfaz suelo-micropilote. Di Donna et al [51] observaron un aumento de la solidez al corte en la interfaz debido al calentamiento Murphy y Mc Cartney [52] encontraron que la temperatura no afecta la respuesta friccional. Un micropilote no se puede expandir libremente debido a la restricción de corte lateral en la interfaz suelo-micropilote y la posible restricción de la cabeza.

Los resultados de campo demuestran que se producen deformaciones termoplásticas permanentes en la interfaz micropilote de energía-arcilla orgánica, lo que indica solidez al corte lateral, después de las deformaciones plásticas los suelos tienen mayor solidez al corte no drenado, dando como resultado una mayor restricción a la expansión térmica del micropilote.

La reducción de la deformación axial térmica con los cambios de temperatura indican un aumento en la resistencia de las capas del suelo, por todo lo anterior decimos que el cambio térmico es debido a la restricción del micropilote por la presión de confinamiento lateral, finalmente se comprobó que la tensión axial sucede en la mitad de la longitud del micropilote [50, 53].

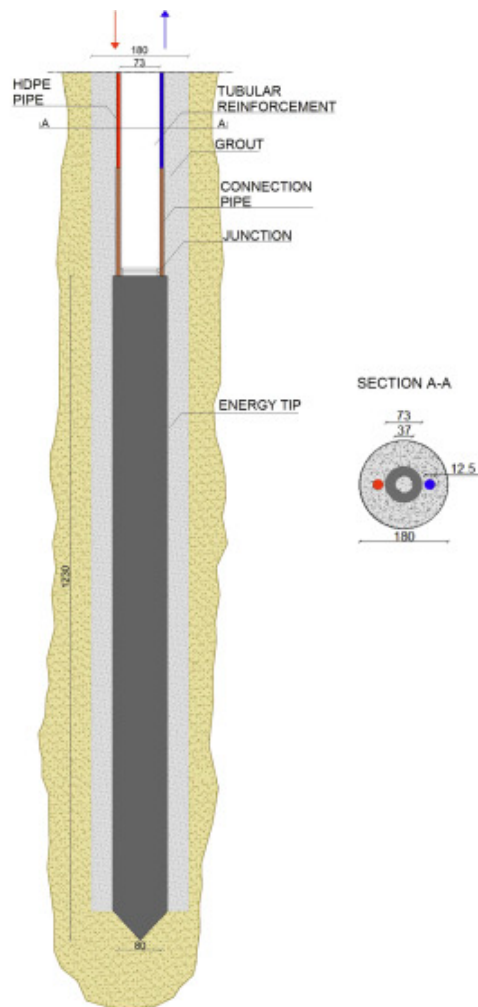


Figura 3.10: Esquema de micropilote de energía [53].

Los efectos de la simulación presentan que la mayor producción de energía se encuentra en el área del micropilote y que a mayor conductividad térmica mayor es el gradiente de temperatura. Además, los tres factores más influyentes en el diseño son: La longitud del micropilote, la conductividad del concreto y el diámetro de la tubería, este último es un problema ya que la gran importancia del diámetro de la tubería es quien maximiza el rendimiento energético, lo cual se debe a de que las tuberías ocupan una mayor porción dentro de la sección transversal de un micropilote con respecto con la de un pilote, entonces, el problema de maximizar las tuberías en U tiene las limitaciones en el espacio dentro del micropilote y la posible interferencia térmica

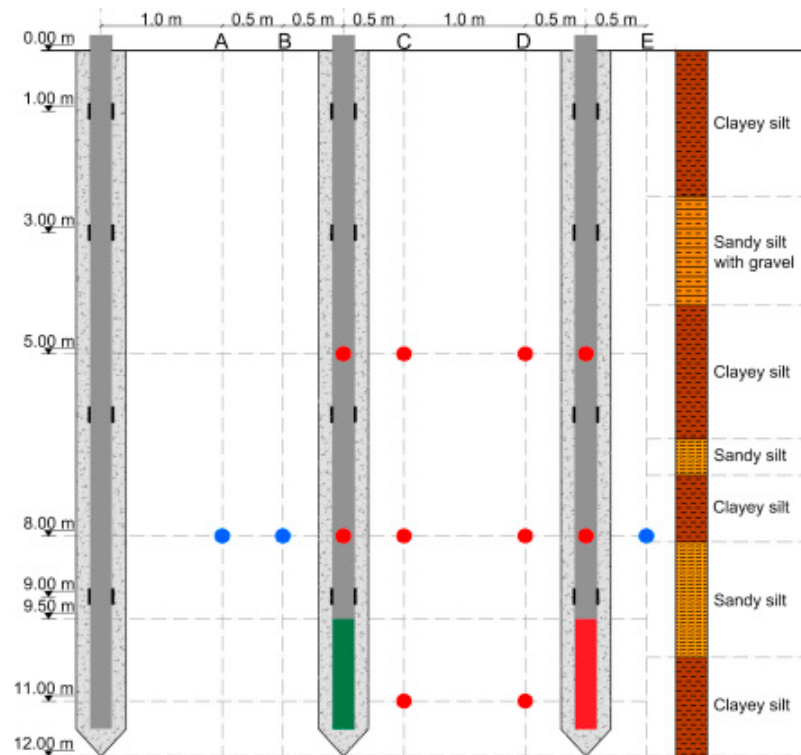


Figura 3.11: Esquema en planta del sitio de prueba, sensores y temperatura [53].

de las tuberías si están muy juntas. Finalmente, la velocidad del fluido y la conductividad térmica son los siguientes parámetros, este último se puede mejorar mediante el uso de aditivos (nanofluidos), pero el primero se controla mediante la configuración de la bomba de circulación.

El papel dominante de la conductividad térmica del suelo es quien da la maximización del rendimiento energético de los micropilotes de energía tanto para operaciones a corto como a largo plazo. Por lo que se debe evaluar siempre la idoneidad del suelo, la capacidad calorífica específica del suelo ocupa el segundo lugar, ya que es importante en la fase transitoria de transferencia de calor, mientras que es irrelevante en el estado estacionario, el tercer lugar es para la capa aislante puesto que es quien da el aislante térmico entre el suelo y el edificio, además inhibe el trueque de calor entre el suelo y la atmósfera, por lo que a largo plazo la temperatura de la parte superior del dominio suelo-montón tiende a aumentar [48, 54].

Como los pilotes son más grandes permiten diferentes configuraciones,

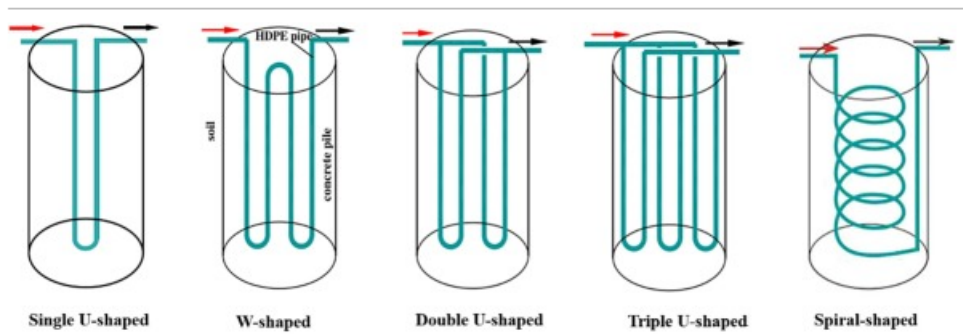


Figura 3.12: Esquema de diferentes tipos de configuración de tuberías en una pila de energía [62].

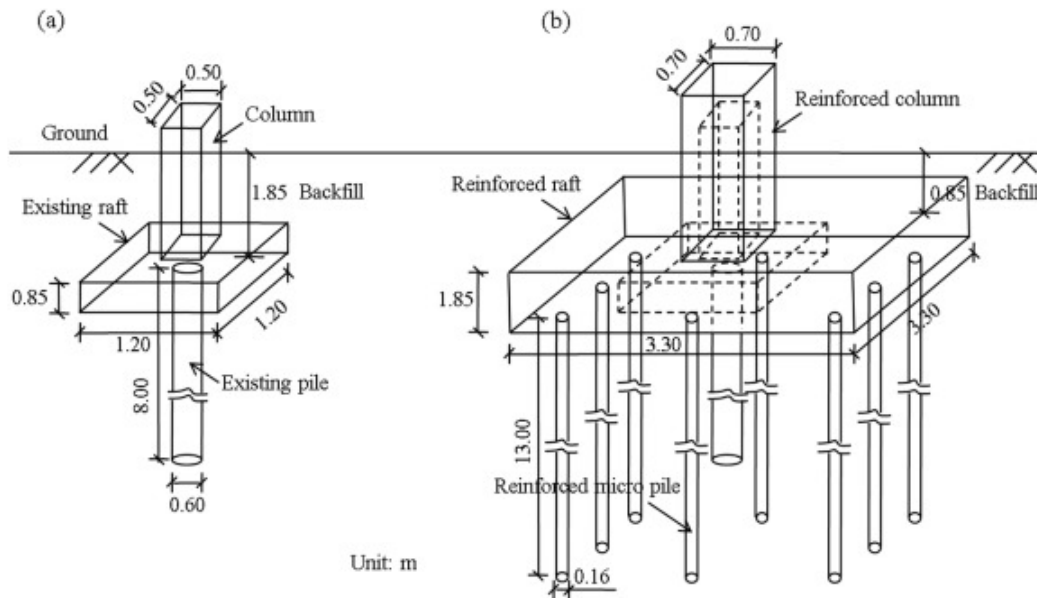


Figura 3.13: Sistema de micropilote existente (a) y reforzado (b) [66].

estás formas afectan el rendimiento térmico, la viabilidad económica y constructiva, para los cuales se demostró que la forma W era el más eficiente [60] pero la eficiencia en el transporte de calor los triples U eran mejores [61]. Para los micropilotes solo permite la configuración en U por su dimensión, la variación en la eficiencia de transferencia de calor entre los diferentes tipos se debe al área de contacto entre la tubería y el hormigón [63, 64, 65]. El fluido es importante ya que las diferencias en la conductividad térmica y el

caudal volumétrico afectan el rendimiento térmico, pero se ha demostrado que el número de tuberías y la longitud ocasionan el mayor impacto en el rendimiento térmico. Un estudio reciente [66] tomó una estructura existente y la modificó, construyendo 8 micropilotes y ampliando el dado (ver **Figura 3.13**), para lo cual consideraron que la tubería de acero y el dado tienen un comportamiento termoelástico lineal y el suelo termoelástico no lineal (Modelo de EB de Duncan-Chang) encontrando que la temperatura aumenta de $0,5^\circ$ cada vez que la velocidad se duplicaba, además de que las tensiones térmicas disminuyen con la profundidad. Finalmente, mostraron que la potencia de intercambio aumenta con el aumento del número de micropilotes de energía y que es influenciada con la posición del micropilote y la tensión térmica aumenta con el aumento de la temperatura de entrada.

3.6. Carga cíclica en micropilotes helicoidales

El micropilote helicoidal o de tornillo es un nuevo tipo de micropilote que consta de un segmento liso y uno cónico. Cuando se utilizan micropilotes en áreas donde las cargas dinámicas son del diario vivir, el desempeño dinámico se vuelve tan importante como el desempeño estático. Muchas estructuras están sometidas a cargas cíclicas originadas por terremotos, viento, marea y vibraciones de máquinas, dichas cargas son transferidas de la estructura a los cimientos del micropilote como cargas cíclicas axiales. En la literatura, el cambio en la capacidad del micropilote, la rigidez de la cabeza del micropilote y el desplazamiento acumulativo a menudo se examinan como una indicación del comportamiento cíclico axial. Las capacidades axiales y el mecanismo de falla de los micropilotes de tornillo en un sitio de suelo cohesivo fueron examinados por primera vez a través de un programa de prueba de carga estática [58] en donde se encontró que un pequeño desplazamiento acumulativo disminuía con el aumento del diámetro del micropilote y la longitud del fuste (en suelos cohesivos). Un reciente estudio de micropilotes helicoidales en suelos no cohesivos sometidos a cargas cíclica unidireccional, fue diseñado para replicar la carga inercial de la superestructura durante las vibraciones verticales. Los resultados mostraron que las curvas de carga axial vs desplazamiento tenían un comportamiento no lineal, mostrando que los micropilotes son inestables, además, se encontró que la falla del segmento roscado era mejor representada por el modo de corte cilíndrico lo que se puede interpretar como que la superficie de falla probablemente ocurre a lo largo de la superficie exterior (ver **Figura 3.15**). Finalmente los micropilotes

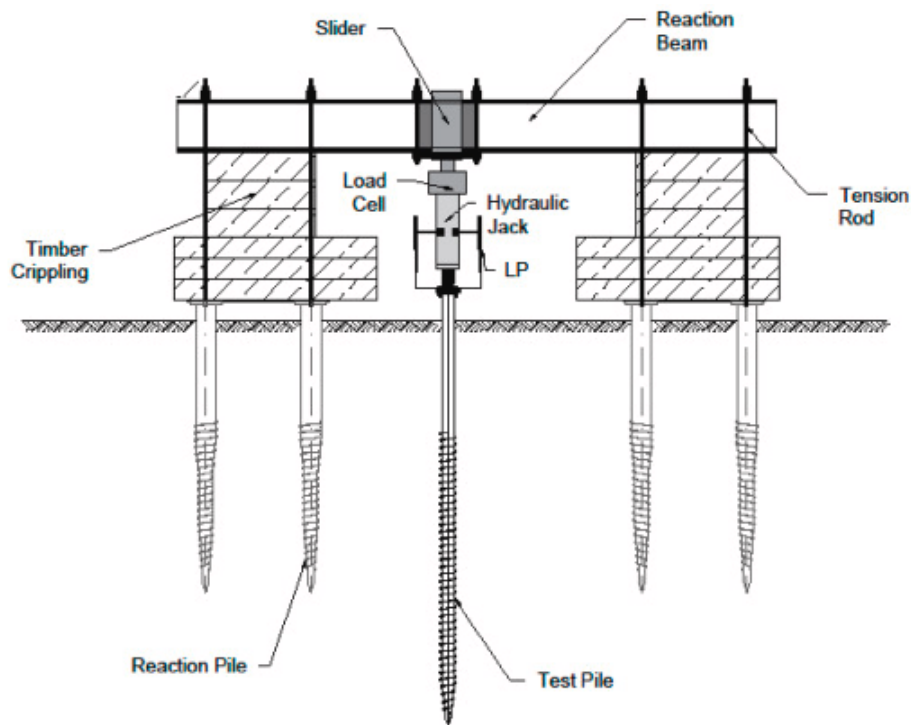


Figura 3.14: Configuración de la prueba de carga de campo [59].

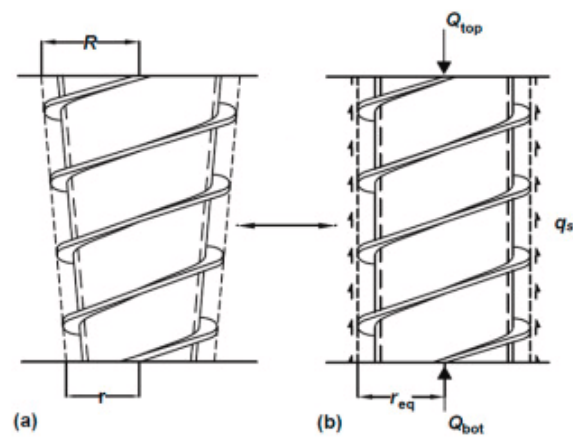


Figura 3.15: Esquemas de equivalencia: (a) segmento cónico y (b) segmento cilíndrico equivalente [59].

no desarrollaron falla por hundimiento ni mostraron una reducción en la capacidad axial donde alcanzaron el estado límite de servicio al acumular un

desplazamiento durante la carga cíclica [\[59\]](#).

Bibliografía

- [1] J.C Hernández et al, *Cimentaciones profundas, procedimientos de ejecución y cálculo*, (2002).
- [2] *Manual on Micropiles Design and Construction*, FHWA (2005).
- [3] F. Gonzales y H. Armando, *Análisis teórico de métodos y procesos en construcción de micropilotes inyectados para fundaciones*, Tesis de grado (2014).
- [4] A. del P. Botello, *Sobre el comportamiento de micropilotes trabajando a flexión y/o cortante en estructura de tierra*, Tesis doctoral (2015).
- [5] D.M Holloway, Y. Moriwaki et al *Response of a Pile Group to Combined Axial and Lateral Loading*, *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Boulimia Publishers, Stockholm, Vol. 2, pp. 731-734. (1981).
- [6] D.A Brown, C. Morrison and L.C Reese, *Lateral Load Behavior of Pile Group in Sand*, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 114, No. 11, pp. 1261-1276. (1988).
- [7] I. Juran, J. Hasan, G.M Weinstein and L. Sourisseau (FOREVER), *Synthesis of the Results of the National Project on Micropiles* (2003).
- [8] A. Cadden and J. Gomez, *Buckling of Micropiles - A Review of Historic Research and Recent Experiences*, *Schnabel Engineering Associates Report*, West Chester (2002).
- [9] K. Ishihara and M. Cubrinovski, *Soil-Pile Interaction in Liquefied Deposits undergoing Lateral Spreading*, *Proc. 11th Danube-European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Porec, Croatia, pp. 51-64. (1998).
- [10] M.L Gómez et al, *Guía para el proyecto y ejecución de micro pilotes en obras de carretera* (2005).

- [11] E.D Mafud, *Capacidad portante de micropilotes en suelo cementado, Tesis de maestría (2009)*.
- [12] B.H Fellenius, *Unified Design of Piled Foundations with Emphasis on Settlement Analysis (2004)*.
- [13] S.S Liew and C.C Fong, *Design and Construction of Micropiles. Geotechnical Course for Pile Foundation Design and Construction, 1-49 (2003)*.
- [14] S.L Pearlman and J.R Wolosick, *Pin Piles for Bridge Foundations, Proceedings, 9th Annual International Bridge Conference, Pittsburgh, Pennsylvania (1992)*.
- [15] A.P Basualdo, *Análisis comparativo del uso de micropilotes de bambú y concreto para la estabilización de taludes, Tesis de pregrado (2022)*.
- [16] B. Sharman and P. Buragohain, *Behaviour of Micropile Groups under Oblique Pull Out Loads Sand. Indian Geotechnical, Journal, 44(4), 400-408 (2014)*.
- [17] M. Endo, A. Minou, T. Kawasaki and T. Shibata, *Negative skin friction acting on steel piles in clay, Proc. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp. 85-92 (1969)*.
- [18] F. Lizzi, *The Pali Radice (Root Piles), Symposium on Soil and Rock Improvement Techniques including Geotextiles, Reinforced Earth and Modern Piling Methods, Bangkok. (1982)*.
- [19] A.H Hunter y Davisson, *Measurements of pile load transfer, Proceeding of Symposium on Performance of Deep Foundations, San Francisco, SPT 444, pp. 106-117. (1969)*.
- [20] J.O Osterberg, *The Osterberg load test method for drilled shaft and driven piles, Great Lakes Area Geotechnical Conference, Seventh International Conference and Exhibition on Piling and Deep Foundations, Deep Foundation Institute, Vienna, Austria, June 15-17, 17 p (1998)*.
- [21] O.S Gregersen, G. Aas and E. DiBiagio, *Load test on friction piles in loose sand, Proceeding of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ICSMFE, Moscow, Vol. 2, Paper 3/17, pp. 109-117 (1973)*.

- [22] E.N Cerron y T.M Delgado, *Diseño de micropilotes para soportar cargas de las viviendas del condominio Villa Chorrillos en la avenida Hernando de Lavalle, Tesis de pregrado (2018).*
- [23] H.B Seed and I.M Idriss, *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division 97(9), 1249-1273 (1971).*
- [24] S.S.C Liao and R.V Whitman, *Overburden Correction Factors for SPT in Sand, Vol 112 No. 3, pag. 373-377 (1986).*
- [25] E. Kavazanjian et al, *Design Guidance: Geotechnical Earthquake Engineering for Highways, Geotechnical Engineering Circular, No.3, Federal Highway Administration Publication, U.S. Department of Transportation (1997).*
- [26] Stark and Eid, *Drained Residual Strength of Cohesive Soils, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 5. (1994).*
- [27] H.G Poulos and E.H Davis, *Pile Foundation Analysis and Design, John Wiley and Sons, 397 pages. (1980).*
- [28] T. Ito and T. Matsui, *Methods to Estimate Lateral Force Acting on Stabilizing Piles, Soil and Foundations, Vol. 15, No. 4. 401 (1975).*
- [29] S. Hassiotis, J.L Chameau and M. Gunaratne, *Design Method for Stabilization of Slopes with Piles, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No. 4, 314-323 pp. (1997).*
- [30] B.H Fellenius, *Unified Design of Piled Foundations with Emphasis on Settlement Analysis (2004).*
- [31] M.J Tomlinson, *Tomlinson, M.J. Cimentaciones, diseño y construcción. 5ª Ed., (1971).*
- [32] B.H Fellenius, *Foundation design approach of past, present and future. Geo-Strata, A 276 (2008).*
- [33] R.G Lablanca, *Pruebas de carga en cimentaciones profundas.*
- [34] T.H Hanna, *Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, Trns. Tech. Publication (1985).*
- [35] L.W Abramson, T.S Lee, S. Sharma and G.M Boyce, *Slope Stability and Stabilizaation Methods, John Wiley and Sons Inc, p. 341 (1996).*

- [36] P.J Gutiérrez, *método de diseño de pilotes en suelos licuables aplicado al proyecto nuevo terminal de pasajeros VTP Valparaíso, Tesis de pregrado (2018)*.
- [37] G.T Schuster and A. Quintus-Bosz, *Wavepath eikonal travelttime inversion: Theory. Geophysics, 58(9): 1314-1323, doi:10.1190/1.1443514. (1993)*.
- [38] C. Pérez, M. Mateo y A. Macia, *Aplicación de tomografía de refracción sísmica y análisis de microtemores como técnicas de prospección geofísicas en estudios geotécnicos en edificación, Informes de la Construcción Vol. 65, 530, 203-212. (2013)*.
- [39] D.A Bruce, *Small Diameter Cast-in-Place Elements for Load Bearing and In Situ Earth Reinforcement, John Wiley and Sons. Chapter 6. pp. 406-492 (1994)*.
- [40] G.K Burke, D. Cacoilo and K. Chadwick, *SuperJet Grouting: New Technology for In Situ Soil Improvement. Washington: Transportation Research Board (2000)*.
- [41] R.S Carrasco and J.D Bauzá, *Recalce de cimentaciones mediante inyecciones de resinas. Sevilla: Dep. de Estructuras de Edificaciones e Ingeniería del Terreno (2016)*.
- [42] J.C Novarece, *Solución con micropilotes para cimentaciones, recalces, retención de tierras y estabilización de laderas*.
- [43] R. Ortiz y E.O Shelley, *Incrementos de presión de poro debido a la expansión de cavidades en arcillas de la ciudad de México, XXIII Reunión Nacional de Profesores de Mecánica de Suelos*.
- [44] A.S Vesic, *Expansion of cavities in infinite soil mass, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 98, 265-290 (1972)*.
- [45] H.S Yu, *Cavity expansion methods in geomechanics, Dordrecht, Boston, Kluwer Academic Publishers (2000)*.
- [46] J.C Orozco y M.A Ramírez, *Apuntes de clase enfocados a la ingeniería de cimentaciones, Facultad de ingeniería, Universidad de la Salle (2020)*.

- [47] M. Khidri and L. Deng, *Thermal response prediction of a prototype Energy Micro-Pile, Geomechanics for Energy and the Environment, Vol. 16, pag. 64-82 (2018).*
- [48] M. Khidri and L. Deng, *Energy performance assessment of thermo-active micro-piles via numerical modeling and statistical analysis, Geomechanics for Energy and the Environment, Vol. 29 100268 (2022).*
- [49] L. Laloui, M. Nuth and L. Vulliet, *Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile, Int J Numer Anal Methods Geomech, Vol. 30 (8), pag. 763-781 (2006).*
- [50] P.J Bourne-Webb, B. Amatya, K. Soga, T. Amis, C. Davidson and P. Payne, *Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles, Geotécnia, Vol. 59 (3), pag. 237-248 (2009).*
- [51] A. Di Donna, L. Laloui, *Energy Geostructures: Innovation in Underground Engineering. ew Jersey, NY, USA: John Wiley and Sons, (2017).*
- [52] K.D Murphy, J.S McCartney, K.S Henry, *Evaluation of thermo-mechanical and thermal behavior of full-scale energy foundations, Acta Geotech., Vol. 10 (2), pag. 179-195 (2014).*
- [53] F. Ronchi, D. Salciarini, N. Cavalagli and C. Tamagnini, *Geomechanics for Energy and the Environment, Vol. 16, pag. 64-82 (2018).*
- [54] F. Cecinato and D. Salciarini, *Energy performance assessment of thermo-active micro-piles via numerical modeling and statistical analysis, Geomechanics for Energy and the Environment, Vol. 29, pag. 179-195 (2014).*
- [55] C. Wu, H. Xia, D. Qin and J. Luo, *Tunnel entrance crossing spoil heap deformations control by micropile combine with coupling beams, Geohazard Mechanics.*
- [56] B.B Broms, *Lateral resistance of piles in cohesionless soil. J. Soil Mech. Found. Div., ASCE 90 (3), 123-156. (1964).*
- [57] A. Kamura, T. Kaneko, N. Sato and M. Kazama, *Case study on viability of using head-separated micropiles as foundation system for check dams, Soils and Foundation, Vol. 63 101275. (2023).*

- [58] A. Kamura, T. Kaneko, N. Sato and M. Kazama, *Field behaviour of screw micropiles subjected to axial loading in cohesive soils*, *Can. Geotech J. Editors Choise*, Vol. 01. (2019).
- [59] M. Khidri and L. Deng, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering s*, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 143 106601 (2021).
- [60] A.A Mehrizi , S. Porkhial , B. Bezyan , H. Lotfizadeh, *Energy pile foundation simulation for different configurations of ground source heat exchanger*, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 70 pp. 105-114 (2016).
- [61] J. Gao, X. Zhang, J. Liu, K. Li, J. Yang, *Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles: An application* *Appl. Energy*, 85 pp. 901-9101 (2008).
- [62] L. Zhang, H. Han, W. Li, K. Guo, M. Yuan, Z. Liu, *A critical assessment and summary on the low carbon energy pile technologies based on the life-cycle perspective: Challenges and prospects*, *Applied Thermal Engineering* 243 122605 (2024).
- [63] M. Faizal, A. Bouazza, R.M Singh, *Heat transfer enhancement of geothermal energy piles* *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 57 pp. 16-33 (2016).
- [64] S. Lee, S. Park, M. Kang, K. Oh, H. Choi, *Effect of tube-in-tube configuration on thermal performance of coaxial-type ground heat exchanger*, *Renew. Energy*, 197 pp. 518-527 (2022).
- [65] S. Park, S. Lee, D. Lee, D. Ahn, H. Choi, *Effect of thermal interference on energy piles considering various configurations of heat exchangers*, *Energ. Buildings*, 199 pp. 381-401 (2019).
- [66] G. Kong, T. Cao, Y. Hao, Y. Zhou, L. Ren, *Thermomechanical properties of an energy micro pile-raft foundation in silty clay*, *Underground Space*, Vol. 6 (1) pp. 76-84 (2021).
- [67] E. Celebi, S. Firat, G. Beyhan, I. Cankaya, I. Vural, O. Kirtel, *Field experiments on wave propagation and vibration isolation by using wave barriers*, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29 pp. 824-833 (2009).
- [68] A. Turan, D. Hafez, M.H El Naggar, *The performance of inclined secant micro-pile walls as active vibration barriers*, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 55 pp. 225-232 (2013).

- [69] J. Donga, Z. Wua, X. Lia, H. Chen, *Dynamic response and pile-soil interaction of a heavy-haul railway embankment slope reinforced by micropiles*, *Computers and Geotechnics*, Vol. 100 pp. 144-157 (2018).
- [70] A. Turan, D. Hafez, M.H El Naggar, *Performance evaluation of rail trackbed stiffness: pre and post stabilisation*, *Construction and Buildings Materials*, Vol. 407 133452 (2023).