



Ingeniería

ISSN: 0121-750X

ISSN: 2344-8393

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Castellanos Guerrero, Wendy M.; Rodríguez Rincón, Edgar
Inclusión de micropilotes como elementos recuperadores de
carga en cimentaciones: revisión del estado del conocimiento
Ingeniería, vol. 27, núm. 2, e300, 2022, Mayo-Agosto
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.16984>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=498872430003>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UAEM redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Inclusion of Micropiles as Load Recovery Elements in Foundations: Literature Review

Inclusión de micropilotes como elementos recuperadores de carga en cimentaciones: revisión del estado del conocimiento

Wendy M. Castellanos Guerrero^{ID}*¹, Edgar Rodríguez Rincón^{ID}¹

¹Universidad Militar Nueva Granada (Cajicá, Colombia)

correspondence e-mail: d7303309@unimilitar.edu.co

Recibido: 13/09/2021. Modificado: 23/09/2021. Aceptado: 04/10/2021.

Abstract

Context: Micropiles are used as reinforcing or underpinning elements, a function that has been tested and analyzed by different authors. In Colombia, the use of this technique is limited to the geotechnics expert's own concepts, which consists of empirical knowledge and successful experiences. Consequently, it is necessary to compile key variables and analytical and numerical methodologies for a better understanding of this technique.

Method: This document presents a state of the art supported by articles and research aimed at analyzing and evaluating the behavior of micropiles as load capacity recovery elements in groups of piles with defects.

Results: The findings identified in the consulted documents are synthesized as a theoretical support that will become a starting point for future research in this field of geotechnical engineering.

Conclusions: It is possible to evidence that micropiles have a positive influence on the load recovery of existing foundations, thus demonstrating the importance of conducting field tests and analyses directly in Colombia, considering the specific strata of soils found in the country.

Keywords: settlement, load capacity, axial stress, micropiles

Language: Spanish

Open access



Cite as: Castellanos Guerrero, W. M., Rodríguez Rincón, E. "Inclusión de micropilotes como elementos recuperadores de carga en cimentaciones: revisión del estado del conocimiento.". *Ing.*, vol. 27, no. 2, 2022. e16984. <https://doi.org/10.14483/23448393.16984>

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Resumen

Contexto: Los micropilotes son utilizados como elementos de refuerzo del suelo o de recalce, dicha función es comprobada y analizada por diferentes autores. En Colombia el uso de esta técnica está limitado a conceptos propios del geotecnista que involucran conocimientos empíricos y experiencias exitosas. En consecuencia, es necesaria la compilación de variables clave y metodologías analíticas y numéricas para la mejor comprensión de esta técnica.

Método: En este documento se presenta un estado del arte sustentado en artículos e investigaciones que tienen como objeto el análisis y la evaluación del comportamiento de los micropilotes como elementos recuperadores de capacidad de carga en grupos de pilotes que presentan defectos.

Resultados: Los hallazgos identificados en los documentos consultados logran ser sintetizados como un soporte teórico que se convierte en un punto de partida para futuras investigaciones en este campo de la ingeniería geotécnica.

Conclusiones: Se logra evidenciar que los micropilotes tienen una influencia positiva en la recuperación de carga de fundaciones existentes, demostrando la importancia de efectuar ensayos y análisis de campo directamente en Colombia, considerando los estratos de suelos específicos que se encuentran en el país.

Palabras clave: asentamiento, capacidad de carga, esfuerzos axiales, micropilotes

Idioma: Español

1. Introducción

En el análisis de los micropilotes como elementos recuperadores de carga es de crucial importancia establecer características y metodologías para la construcción de los mismos, además de entender su comportamiento en los diferentes escenarios en los cuales pueden ser ejecutados. Bajo la premisa anterior se crea un comparativo de cada uno de los aspectos más relevantes que se plasman en las publicaciones objeto de estudio. Los micropilotes poseen un diámetro estándar de entre 100 y 300 mm y una longitud de hasta 30 m, se clasifican ya sea por filosofía del comportamiento o método de inyección de lechada [1], también se pueden dividir de acuerdo con su uso por soporte estructural y reforzamiento in situ [2]. En cuanto a su metodología de diseño, es prioridad tener en cuenta la estimación del movimiento del micropilote y la interacción relativa suelo/pilote [3], para el uso de su técnica como elementos de recalce, mejoradores o recuperadores de capacidad de carga frente a los múltiples fallos que se puedan presentar en una cimentación [4]. Considerando lo anterior, se ejecutan pruebas con base en la evaluación del comportamiento de micropilotes individuales y en grupo, contemplando sus características propias [5], lo que permite establecer variables de nivel geotécnico.

Durante la revisión bibliográfica es claro que el uso de micropilotes en la recuperación de cimentaciones es ampliamente documentado, a partir de ello es viable considerar la inclusión de dichos elementos en grupos de pilotes que presentan defectos; en los documentos se comparten diferentes variables, destacando la capacidad de carga, los esfuerzos axiales y el asentamiento, estas se estudian y se discuten en aproximadamente el 90 % de las publicaciones consignadas en este artículo. Como se mencionó previamente no se relacionan investigaciones directamente orientadas a su uso en grupos de pilotes; sin embargo, es posible adaptar resultados consignados por diferentes autores, principalmente internacionales, quienes analizan esta técnica en función de sus experiencias en esta área, siendo punto de partida para comprobar la efectividad del uso de los micropilotes en

la práctica de fundaciones en Colombia, ya que actualmente no existen antecedentes ni avances que contribuyan a generar pautas o criterios específicos y generales para el uso apropiado de esta técnica en terreno colombiano, especialmente enfocándose en el uso o la implementación como elementos recuperadores de capacidad de carga. El desarrollo del presente artículo se estructura en metodología, características generales de micropilotes, micropilotes como elementos recuperadores de capacidad de carga, análisis de variables y conclusiones.

2. Metodología

Con el fin de dar respuesta al objetivo principal de este proyecto, se realizó una consulta detallada en distintas publicaciones a través de diferentes bases de datos virtuales y repositorios digitales a nivel internacional y nacional, respecto al uso de los micropilotes como elementos recuperadores de capacidad de carga de cimentaciones y estructuras. Se creó una base de datos en la que se procedió a depurar la información necesaria y solvente de un total de 56 publicaciones, comprendidas entre los años 1995 y 2019, tal como se evidencia en la Figura 1.



Figura 1. Investigaciones consultadas relacionadas por año de publicación

Se creó un marco conceptual histórico del área de geotecnia, permitiendo la creación de un resumen del estado del arte en el que se definen clases, características, procesos constructivos, usos y aplicaciones generales de estos elementos.

3. Características generales de micropilotes

3.1. Clasificación

Los micropilotes se pueden clasificar dependiendo de algunas de sus características como diámetro, proceso de construcción o naturaleza del reforzamiento; sin embargo, las clasificaciones más importantes son dos: mediante filosofía del comportamiento de los mismos y con base en el mé-

todo de inyección de lechada [1]; ahora bien, para otros autores [6] el tipo A se define como un método de inyección independiente, no como un tipo de micropilote. En la Figura 2 se evidencia que para el primer caso se consideran a su vez dos subtipos, dependiendo de la manera en la cual soporte la carga, ya sea directamente sobre la cabeza del micropilote o mediante estabilización por interconexión de varios de ellos.

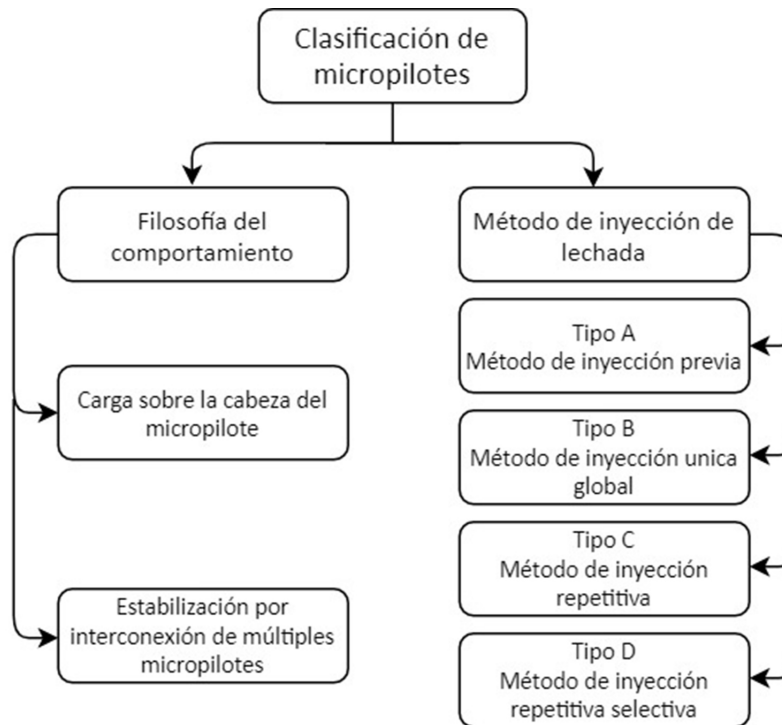


Figura 2. Clasificación de micropilotes por filosofía y método de inyección

Aquellos que soportan la carga directamente sobre la cabeza del micropilote son conocidos como de soporte axial y son diseñados para transferir la carga a un estrato más apropiado, por lo cual son utilizados también para reforzamiento de estructuras, siendo este tipo el más usado. El segundo caso de comportamiento es el de interconexión tridimensional de micropilotes reticulares, en el que se crea una estructura confinada de suelo/pilote que trabaja en apuntalamiento, estabilización y retención de terreno; no requieren reforzamiento estructural, ya que no soportan las cargas de manera individual como en el primer caso, lo que hace que no sean tan utilizados [7].

Para la segunda clasificación, por el método de la inyección de lechada, los micropilotes se dividen en cuatro categorías [1] de acuerdo con el tipo y la presión de la lechada utilizada, como se muestra en la Tabla I.

3.2. Construcción y diseño

En proyectos de ingeniería civil que requieran el uso de micropilotes podrían establecerse ciertas etapas de diseño y construcción, con base en variables de estimación del movimiento e interacción relativa suelo/pilote, por lo cual se realizan pruebas de carga previas a la producción y la instalación del mismo.

Tabla I. Métodos de inyección de lechada

Tipo	Proceso de inyección
A – Método de inyección previa	La lechada es colocada por gravedad solamente, no es presurizada, se usan morteros de arena cemento y lechadas de cemento puro.
B – Inyección única global	La lechada de cemento se inyecta a presiones en intervalo de 0,3 a 1,0 MPa.
C – Inyección repetitiva	La lechada es colocada por gravedad, entre 15 y 25 min más tarde y antes del endurecimiento se verterá una lechada similar a la anterior con una presión de al menos 1,0 MPa.
D – Inyección repetitiva selectiva	La lechada es colocada por gravedad, una vez se endurece se verterá una lechada similar a la anterior con una presión entre 2,0 y 8,0 MPa.

Fuente: elaboración propia a partir de [1]

El proceso de selección del tipo de micropilote a construir debe contar con un estudio de suelos que permitirá de una manera idónea establecer el tipo de lechada y el proceso de inyección, considerando como factor principal el tipo de suelo y sus características, tal y como se evidencia en la Tabla II.

Tabla II. Tipo de inyección de lechada a utilizar según tipo de suelo

Tipo de suelo	Tipo de inyección de lechada
Rocas sanas, suelos cohesivos muy duros y arcillas rígidas.	Tipo A
Rocas más o menos sanas, suelos cohesivos semiduros y suelos granulares.	Tipo B
Rocas blandas y fisuradas y en materiales granulares gruesos y de densidad media.	Tipo C
Suelos cohesivos (salvo los muy duros), suelos de consistencia baja o media y suelos granulares.	Tipo D

Fuente: elaboración propia a partir de [1]

Una vez culminada la etapa de diseño se procederá a la construcción que consta de varias fases de ejecución: perforación, fabricación y colocación de la armadura, producción e inyección de la lechada o mortero. En la primera fase, la perforación con taladro podrá ser ejecutada por varios métodos como perforación no encamisada, ya sea por sistema con barrena helicoidal hueca, técnica de trabajo en seco apropiada para suelos con o sin cohesión, o por sistema de tubo simple con rotación, utilizado en suelos limosos, arenosos y gravas finas; requiere lavado de remoción de detritos. También existe la perforación encamisada, dividida en Duplex tipo A y tipo F, ambas son utilizadas en suelos que requieren soporte; en el tipo A la perforación se realiza en seco, ya que el suelo se retira de manera mecánica, mientras el F requiere de la inyección de líquidos para la remoción del suelo [8]. Una vez definido el método de perforación, se continúa con la construcción y la colocación de la armadura final del micropilote que podrá ser por barra, tubería o barra/tubería, la cual deberá ocupar más o menos el 50 % del volumen de la perforación [1], estos valores podrán variar de acuerdo al tipo de armadura; los diámetros aproximados para una estructura de barra se presentan en la Tabla III.

Con respecto a la fase de fabricación de lechada, la dosificación corresponde a una relación agua/cemento que se fijará en función de la resistencia que se requiera y del tipo de inyección

Tabla III. Diámetros de perforación

Diámetro de perforación (mm)	Diámetro de micropilote (mm)	Diámetro de armadura (mm)
100	95,25	47,25 - 50,25
120	114,30	50,26 - 60,30
140	133,35	60,31 - 70,35
160	152,40	70,36 - 80,40
180	171,45	80,41 - 90,45
200	190,50	90,46 - 100,50
220	209,55	100,51 - 110,55
250	238,15	110,56 - 125,65

con la cual se vaya a trabajar. En el caso del mortero, su contenido mínimo de cemento debe ser de 375 kg/m^3 o superior si las especificaciones del proyecto lo requieren [6], [8]. Su resistencia será medida a través de probetas con edades a 28 días y deberá presentar en este plazo valores entre 25 y 40 MPa [9].

A los siete días, la resistencia de las probetas a compresión simple no podrá ser inferior al 60 % del requerido a los 28 días, esto basado en la norma europea de instrucción de hormigón estructural (EHE) [6], que maneja rangos y valores similares a la AASHTO T106/ASTM C-109 [9], tal como se presenta en la Figura 3.

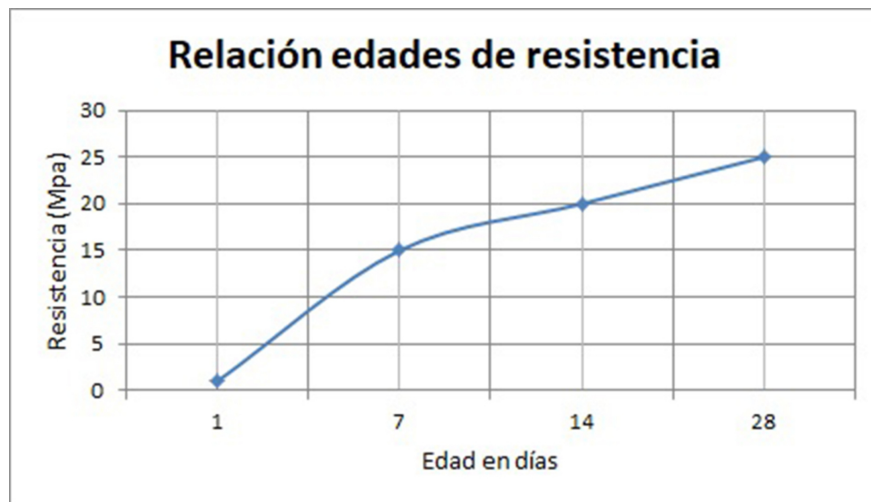


Figura 3. Evolución de la resistencia a compresión medida a 28 días

Fuente: elaboración propia a partir de [6].

3.3. Usos

Los micropilotes actualmente son utilizados en dos ramas principales: soporte estructural y reforzamiento in situ. Dentro del área de soporte estructural se incluyen cimentaciones para nuevas estructuras, recalce de cimentaciones existentes y refuerzo sísmico, mientras que el área de reforzamiento in situ se implementa en estabilización de terraplenes y taludes, protección de suelos, reduc-

ción de asentamientos y estabilidad estructural. Ahora bien, haciendo énfasis en el área de soporte estructural y su uso en el recalce de cimentaciones existentes, se puede encontrar una subdivisión: reparación o reemplazo de cimentaciones existentes, control de movimientos y recuperación de la capacidad de la cimentación [2]. En la Tabla IV se puede evidenciar el comportamiento de diseño y el tipo de construcción utilizado en cada una de las áreas y los usos.

Tabla IV. Comportamiento de diseño y tipo de construcción

Soporte estructural			
Uso	Cimentaciones estructuras nuevas	Recalce de cimentaciones existentes	Refuerzo sísmico
Comportamiento de diseño	Caso 1	Caso 1	Caso 1
Tipo de construcción	Tipo A	Tipo A	Tipo A
	Suelos arcillosos duros y rocas	Suelos arcillosos duros y rocas	Suelos arcillosos duros y rocas
	Tipo B, C, D	Tipo B, C, D	Tipo B, C, D
	Suelos normales	Suelos normales	Suelos normales
Frecuencia de uso	95 % aproximadamente de uso a nivel mundial		
Reforzamiento in situ			
Uso	Estabilización de pendientes y taludes	Fortalecimiento de terreno	Reducción de asentamiento y estabilidad estructural
Comportamiento de diseño	Caso 1 y 2	Caso 2	Caso 2
Tipo de construcción	Tipo A y B	Tipo A y B	Tipo A
	Suelos arcillosos duros y semi duros, rocas y suelos granulares	Suelos arcillosos duros y semi duros, rocas y suelos granulares	Suelos arcillosos duros y rocas
Frecuencia de uso	5 % aproximadamente de uso a nivel mundial		

4. Micropilotes como elementos recuperadores de carga

Los pilotes son uno de los principales elementos utilizados en cimentaciones profundas, como se mencionó anteriormente; rara vez se construyen de manera individual, generalmente trabajan en grupo con el fin de aprovechar su gran diámetro y su capacidad de carga en la cimentación. En la práctica, su diseño está basado en la evaluación del comportamiento de cada pilote de manera individual, el cual afectará directamente el comportamiento y las características del grupo [5]. Los hallazgos compilados en los documentos consultados se mostrarán a continuación.

La capacidad de carga máxima de un pilote es determinada dependiendo del tipo de carga como se muestra en la ecuación (1).

$$Q_{ult} = Q_p + Q_s \quad (1)$$

Donde Q_{ult} es la capacidad última de carga del pilote individual, Q_p es la capacidad de carga de la punta del pilote y Q_s es la resistencia por fricción [5]. En cuanto a la capacidad de carga del grupo de pilotes, esta es calculada de una manera similar a la de los pilotes de manera individual,

tal y como se muestra en la ecuación (2).

$$Q_{G_{ult}} = E \times N \times N \times Q_{ult} \quad (2)$$

Donde $Q_{G_{ult}}$ es la capacidad última de carga del grupo de pilotes, E es el coeficiente de eficiencia calculado con base en la evidencia experimental, N es la cantidad de pilotes que componen el grupo y Q_{ult} es la capacidad de carga última de un solo pilote [10]. Con base en las ecuaciones 1 y 2 se podrá establecer cuál será la capacidad de carga que recuperarán los micropilotes en el caso del fallo de un pilote dentro del grupo inicial. Una vez calculada la capacidad de carga a recuperar por el grupo de micropilotes, se deberán establecer las variables y los parámetros de diseño calculando la capacidad de carga última de cada micropilote, la cual está determinada por la ecuación (3).

$$QM_{ult} = \alpha_i \times \pi \times D \times L_i \quad (3)$$

Donde QM_{ult} es la capacidad última de carga del micropilote individual, α_i corresponde al parámetro ya establecido de interacción suelo/lechada, determinado por el tipo de suelo y dado en kN/m^2 , el cual se evidencia en la Tabla V, D es el diámetro del micropilote y L_i es la longitud de interacción [9].

Tabla V. Parámetro de interacción suelo/lechada según tipo de suelo

Tipo de Suelo	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D
Limo y arcilla (un poco de arena) (suave, medio plástico)	35 - 70 kN/m^2	35 - 95 kN/m^2	50 - 120 kN/m^2	50 - 145 kN/m^2
Limo y arcilla (un poco de arena) (duro, denso a muy denso)	50 - 120 kN/m^2	70 - 190 kN/m^2	95 - 190 kN/m^2	95 - 190 kN/m^2
Arena (un poco de limo) (fina, suelta media densa)	70 - 145 kN/m^2	70 - 190 kN/m^2	95 - 190 kN/m^2	95 - 240 kN/m^2
Arena (un poco de limo, grava) (fino-grueso, medio-muy denso)	95 - 215 kN/m^2	120 - 360 kN/m^2	145 - 360 kN/m^2	145 - 385 kN/m^2
Grava (un poco de arena) (medio-muy denso)	95 - 265 kN/m^2	120 - 360 kN/m^2	145 - 360 kN/m^2	145 - 385 kN/m^2
Suelo glacial (limo, arena, grava) (medio-muy denso, cementado)	95 - 195 kN/m^2	95 - 310 kN/m^2	120 - 310 kN/m^2	120 - 335 kN/m^2

En cuanto a la capacidad de carga del grupo de micropilotes, esta es calculada como se muestra en la ecuación (4).

$$QM_{G_{ult}} = QM_{ult} \times N \times \eta \quad (4)$$

Donde $QM_{G_{ult}}$ es la capacidad última de carga del grupo de micropilotes, QM_{ult} es la capacidad última de carga del micropilote individual, N es el número de micropilotes y η es el factor de eficiencia del grupo de micropilotes respecto a los suelos cohesivos y no cohesivos [9], el cual se muestra en la Tabla VI.

Basados en la capacidad última de carga de los micropilotes individuales y del grupo, se podrá calcular el factor de eficiencia de la cimentación recuperadora de carga [3], el cual está definido por la ecuación (5).

$$\eta_c = \frac{QM_{G_{ult}}}{\Sigma QM_{ult}} \quad (5)$$

Tabla VI. Factor de eficiencia del grupo de micropilotes

Suelo	Tipo de cimentación	Espaciado micropilotes (eje a eje)	Factor de eficiencia de grupo
Suelos cohesivos	La losa está en contacto directo con el suelo	$2,0 D < s < 4,0 D$	1,00
	La losa no está en contacto directo con el suelo y el suelo es duro (el esfuerzo cortante del suelo no drenado es mayor a 95 kN/m ²)	$2,0 D < s < 4,0 D$	1,00
	La losa no está en contacto directo con el suelo y el suelo es relativamente blando	$s = 2,5 D$	0,65
		$s = 3,0 D$	0,70
		$s = 6,0 D$	1,00
Suelos no cohesivos	La losa está en contacto directo con los suelos granulares	$s > 3,0 D$	1,00

A través de los años diferentes autores lograron consolidar las bases del conocimiento acerca del comportamiento del grupo de micropilotes, su factor de eficiencia y el efecto nudo; en varias pruebas de laboratorio [12], [13] brindaron múltiples conclusiones respecto a estas características, en las cuales es evidente un efecto de grupo positivo bajo la carga axial, pero negativo cuando el movimiento del grupo de micropilotes es mayor que el movimiento de un pilote individual.

Dentro de las conclusiones de algunas investigaciones [14], [15] se refiere que el factor de eficiencia del grupo es mayor que 1, siempre y cuando los micropilotes no sean instalados mediante métodos de pre perforación o perforaciones por chorro de agua, se alcanza su pico cuando la razón espacio/diámetro del micropilote se encuentra cercana a 2 y parece incrementar con el número de pilotes que componen el grupo, cuando esta razón es menor a 2 y mayor a 4 el efecto es contrario.

Algunas investigaciones [12]–[15] concluyen que la eficiencia del grupo de micropilotes se ve afectada por la separación que hay entre cada uno de ellos, varios autores han tomado distintos enfoques para predecir la eficiencia, como la relación longitud/diámetro [16]–[18] principalmente en suelos granulares, de manera similar se evaluó dicho factor considerando la inclinación en la que se instalan los micropilotes [19] y lo que esta genera en la eficiencia, obteniendo resultados a través de pruebas in situ; el ángulo de inclinación se contempla con un enfoque de observaciones numéricas y simulaciones [20].

Se desarrolló un modelo numérico en 3D para la estimación de eficiencia de micropilotes individuales y en grupo [21], calculando el impacto de la fricción y la rigidez en la transferencia de cargas, estos análisis son ratificados en estudios posteriores y ensayos adicionales [22]; además de indagar las variables descritas existen documentos enfocados en la importancia de la secuencia de construcción de los micropilotes y cómo afecta el comportamiento del grupo [23].

Es así como se ha demostrado que la eficiencia máxima de un grupo de micropilotes se alcanza siempre y cuando se tengan en cuenta las variables referidas, principalmente la relevancia de trabajar con separaciones entre dos y tres veces el diámetro de los mismos [24], con base en ello se podrá determinar si un grupo de micropilotes sería una opción viable como elementos recuperadores de carga en grupos de pilotes que presentan defectos, considerando que los micropilotes instalados podrán entrar a equilibrar los valores de compresión, tensión y resistencia, que se desequilibraron debido al fallo. Será necesario entrar a evaluar los posibles fallos y los casos en los cuales se consideran una solución óptima.

Los fallos que se pueden presentar en pilotes son múltiples, algunos de los más comunes son: panales por vibración, segregación, lavado de cemento, agrietamiento en los ejes de los pilotes, contaminación del concreto, cierre de la perforación del pilote debido al colapso de las paredes, afectaciones en la estructura del pilote debido a eventos sísmicos, descabezamiento del pilote, deformaciones laterales del terreno, falla de la losa de cimentación, en caso de pilotes no convencionales, como los de madera, debido al tiempo se presentan deterioros del material [4]; para la gran mayoría de estos fallos se podrán utilizar los micropilotes que se encargarán de mitigar los daños producidos en la fundación, excepto en el caso de los eventos sísmicos puesto que el terreno se encuentra en un estado de licuación, lo que lo hace inestablemente apropiado para esta técnica debido a la pérdida de soporte lateral [10].

Existen ciertos factores de nivel físico o geotécnico que influirán de manera positiva en la elección de micropilotes en comparación con otras técnicas, dentro del nivel físico se encuentran: sitios con acceso limitado, condiciones estrechas de trabajo, sitios con restricciones de espacio en general, estructuras débiles adyacentes, etc.

A nivel geotécnico se encuentra: geología de piedra caliza kárstica con vacíos de relleno, suelo con cavidades, fundaciones existentes subyacentes, suelos con un nivel freático alto, entre otros [25]; estos mismos factores permiten evaluar el costo y la rentabilidad del uso de los micropilotes, ya que la ubicación del proyecto es una de las características principales que definirán la viabilidad del uso de este sistema, de igual manera se debe considerar el costo de los materiales a utilizar, los cuales estarán directamente relacionados con la capacidad de carga soportada: a mayor necesidad de soporte mayor longitud y diámetro del micropilote, representando una cantidad más alta de acero, lechada, equipos, mano de obra y por tanto un costo más elevado, a pesar de esto, el costo/beneficio comparado con el uso de pilotes hincados o pozos perforados es superior [10].

La influencia de todas estas variables es evidente en diferentes casos a través de la historia tales como la rehabilitación del puente de 75 años del río Pocomoke en Maryland (Estados Unidos), la fundación original estaba basada en pilotes de madera, los cuales presentaron un compromiso en su capacidad de carga debido a la exposición constante al río, los micropilotes se eligieron para recuperar la carga que habían perdido los pilotes [9].

En Washington (Estados Unidos) se realizó la remodelación y la ampliación del edificio postal agregando nuevos pisos de oficinas y creando un sub-sótano de 7 m de altura, lo que significaba que se construirían nuevas columnas y sería necesario el reforzamiento de la fundación existente por medio de la construcción de micropilotes. Posterior a su construcción, múltiples pruebas fueron ejecutadas mostrando que trabajaban perfectamente con la fundación previa [26].

Para el fortalecimiento de un edificio construido hace 50 años en Sofía (Bulgaria) [27], en razón de asentamiento irregular en la estructura, se hizo necesaria la intervención instalando 57 micropilotes, cada uno de 4 m de longitud con inclinación de 57° mitigando las deformaciones y demostrando la eficiencia y la efectividad de la tecnología de los micropilotes en la reparación de edificios dañados.

En la Provincia de Alta Silesia en Polonia se ejecutó la rehabilitación de una casa que presentaba deflexión en el sector noroeste, a causa de la explotación minera del sector y de la construcción de un piso adicional no contemplado en el diseño original. Se apuntalaron 157 micropilotes de inyección con 300 mm de diámetro y longitud entre 8 y 13 m con la finalidad de minimizar el hundimiento de los muros [28].

La instalación de micropilotes con la intención de soportar el 100 % del peso de la estructura del faro de la Isla Morris en Carolina del Sur (Estados Unidos) [29], se decidió considerando que al momento de la intervención no se conocía el peso real de la estructura ni la contribución residual de los pilotes de cimentación originales; se manejaron 68 micropilotes con capacidad de diseño de compresión permisible de 75 toneladas por pilote, instalados en dos filas concéntricas alrededor de la base de la estructura del faro, gracias a la estabilización se garantizó que este soportaría la temporada de huracanes de otoño y de esta manera se consiguió el objetivo.

Durante la ampliación de la autopista Brooklyn - Queens en Estados Unidos, los micropilotes se utilizaron tanto para las nuevas líneas del viaducto como para el viaducto temporal habilitado con el fin de no restringir el tráfico durante las obras; el factor principal para su elección fue el hecho de que las vibraciones durante la etapa de construcción de los micropilotes eran mínimas en comparación con otros sistemas, así no presentarían afectaciones en los edificios antiguos adyacentes a la autopista [26].

En un último ejemplo de caso real se puede encontrar la ampliación del Hospital Universitario Presbiteriano en Pittsburgh (Estados Unidos), que requirió la construcción de un nuevo foso de elevador de 9 m de profundidad debajo de la base de tres columnas existentes de la estructura adyacente; las dificultades de acceso y el requerimiento de no presentar mayor movimiento cerca de las columnas fueron determinantes. Este proyecto es un claro ejemplo de que los micropilotes diseñados correctamente no solo trabajan de manera axial, sino que trabajan eficientemente de manera lateral aun sin contar con terreno adyacente [26].

5. Variables de análisis

En las publicaciones consultadas para el desarrollo de este documento se hace énfasis en las variables específicas de capacidad de carga, esfuerzos axiales y asentamiento. A continuación, se presentan las investigaciones indicadas junto a sus resultados de acuerdo con cada variable analizada.

5.1. Capacidad de carga

Se establecieron algunos parámetros para las pruebas de carga [11], determinando que se pueden ejecutar con cargas de hasta dos veces la carga de diseño, siempre y cuando no se exceda el 80 % de la capacidad estructural final. Para el caso de pilotes dañados, las cargas de compresión son compartidas entre la fundación existente y los micropilotes, mientras que las cargas de tensión, laterales y de momento son soportadas únicamente por los micropilotes. Para las que presentan daños leves, todas las cargas serán compartidas, ya que las especificaciones del diseño existente son inciertas y se deberá asumir que los micropilotes deberán soportar todas las cargas del diseño.

En el Distrito Federal en Brasil [30], un análisis de micropilotes tipo “Alluvial Anker” efectuó distintos tipos de pruebas de carga obteniendo el aporte de la zapata existente con el nuevo sistema de micropilotes. Se construyeron siete sistemas de placas con micropilotes de 130 mm de diámetro y 8 m de profundidad, así como pilotes de reacción de 170 mm de diámetro nominal y 12 m de profundidad. En las pruebas de carga se realizaron incrementos iguales no mayores al 20 % de la carga de trabajo del pilote durante 30 min hasta dos veces la carga de trabajo. Las pruebas se realizaron con el aporte de la zapata y sin ella, mediante una perforación bajo la misma. Como conclusión se puede establecer que el aporte de la placa al sistema placa pilote es del 23 % en la carga de trabajo. Estos valores demostraron un importante aporte de la placa al sistema en general y los autores recomendaron tomarla en cuenta en futuras metodologías de diseño de rehabilitación con micropilotes “Alluvial Anker”.

En Shanghái (China) [31] se realizó un estudio sobre el comportamiento de micropilotes individuales en arcilla blanda ejecutando dos pruebas de compresión y dos cargas de tensión en cuatro micropilotes de 150 mm de diámetro y 8 m de longitud, estas con el fin de comprobar los resultados que se habían obtenido por los mismos autores años antes [32]. Se utilizaron dos métodos: uno de carga sostenida lenta, probado únicamente en un micropilote bajo compresión con incrementos de carga de 40 kN una vez el micropilote alcanzaba un desplazamiento de 0,1 mm. En el método de prueba de carga sostenida rápida, los aumentos se realizaban cada hora; se utilizó en los tres micropilotes restantes, uno bajo compresión y dos bajo tensión. Los resultados mostraron que los micropilotes en compresión tienen mayores capacidades de carga que aquellos bajo tensión. Se obtuvo mejor rendimiento en aquellos con pruebas de carga rápida, generando un aumento en capacidad de carga de aproximadamente 22 % respecto a aquellos sometidos a pruebas lentas. La capacidad de carga final bajo tensión corresponde al 60 % aproximadamente de la capacidad final de aquellos bajo compresión. Basado en lo anterior y de acuerdo con lo mencionado por [11], la fundación objeto de estudio presentaba un daño leve.

En una ciudad de la India [33] se analizó el uso de micropilotes de 100 mm de diámetro y 4 m de longitud con el fin de recuperar la capacidad de carga del suelo rehabilitando el sistema de cimentación diseñado inicialmente para soportar 600 kN, considerando 120 kN/m² como la presión de soporte segura. Por encima del nivel de la base de cimentación se instaló suelo compactado de hasta 6,5 m de altura compensando el desnivel presentado, que ocasionó una sobrecarga de 130 kN/m² en la base, presentando fallo tanto en vigas como en columnas. Con el software Plaxis 2D se realizó un análisis numérico y un modelo geométrico del caso de estudio, estableciendo la curva de desplazamiento tanto del terreno como del mismo con micropilotes. La presión de carga admisible sin modificaciones fue de 66,8 kN/m² y cercana a la presión de carga permisible de 70 kN/m² considerada en el diseño revisado. En la curva correspondiente al terreno intervenido con micropilotes se mostró mejora general en la capacidad de carga obtenida, con un valor de 260 kN/m², que evidencia el aumento de esta.

Una serie de ensayos en Jumunjin (Corea del Sur) fueron realizados para medir la capacidad de carga y la influencia del asentamiento en micropilotes inclinados en un terreno de arena sílice limpia [34]. Dichas pruebas se adoptaron para micropilotes individuales, en grupo y losas micropiloteadas con cuatro ángulos de instalación de 0°, 15°, 30° y 45° y tres diferentes espaciamientos de 3, 5 y 7 veces el diámetro. Se encontró un incremento en la capacidad de carga con el aumento

del ángulo hasta cierto punto, en donde se empieza a mostrar una disminución o se llega al fallo. Para el caso de los micropilotes individuales la capacidad última de carga se alcanzó a los 15° igual que en el grupo; sin embargo, esta empieza a disminuir hasta que alcanza su punto mínimo a los 45°. El espaciado de los micropilotes no fue significativo en la capacidad de carga. En las losas micropiloteadas la capacidad de carga se vio afectada tanto por el ángulo como por el espaciado. A pesar de ello, la tendencia a alcanzar la última capacidad de carga a los 15° se mantuvo, pero fue evidente que dicha capacidad es siempre mayor cuando el espaciado también lo es, estos resultados son probados a través de cálculos y ensayos in situ además de ser comparados con los resultados de otros autores.

La capacidad portante de la cimentación de un puente en Irán [35] se analizó antes de la inclusión de micropilotes y posterior a la misma, con el fin de comprobar el efecto de esta aplicación en la estabilización del suelo y el aumento en su capacidad de carga; se utilizaron nueve pozos perforados con micropilotes verticales de 18 m de longitud y 80 mm de diámetro inyectados mediante Jet Grouting, a los cuales se le realizaron mediciones por medio de prueba de penetración estándar conocida por sus siglas en inglés SPT (Standard Penetration Test), con estos ensayos se reflejó una relación directa entre los resultados y la mejora de esta variable. Es evidente que a mayor profundidad la capacidad de carga muestra cambios positivos de aproximadamente 60 % a 2,5 m y de hasta el doble al alcanzar 12,5 m, en especial si el suelo presenta características granulares más gruesas. Esta investigación demostró el efecto considerable en la mejora de las propiedades del suelo con los micropilotes.

En Japón, considerando los efectos de los terremotos en cimentaciones se llevaron a cabo pruebas en arena [36] utilizando modelos bajo fuerza gravitacional: con una zapata circular de 40 mm de espesor en acero inoxidable, una con las mismas dimensiones del anterior, pero con un micropilote vertical de 1,8 mm y longitud de 100 mm, por último, una zapata con 8 micropilotes de las mismas dimensiones e inclinación de 60°. Los micropilotes instalados eran recubiertos con arena que simularía la rugosidad de la inyección. Se realizaron varios tipos de pruebas contemplando el contacto directo de la zapata con el suelo o sin él. Se examinó el comportamiento de carga y los desplazamientos de los cimientos, encontrando que la densidad relativa de la arena tuvo influencia en la capacidad de carga de aquellos modelos en los que la zapata tenía contacto. Debido al confinamiento, la presión de la base en la zapata aumentó, al igual que la presión en la superficie de los micropilotes. En las pruebas de la zapata reforzada con micropilotes verticales, la capacidad de carga fue más del doble de la suma de la capacidad de carga individual de la zapata y el grupo de micropilotes. Los ensayos en esta publicación son similares a los ejecutados por [37], que utilizaron modelos en centrifuga con suelos arenosos, pero con el objetivo de calcular el asentamiento y el comportamiento de cargas axiales.

Para determinar la capacidad de carga última de un grupo de micropilotes en suelo arcilloso plástico en India, se estableció una ecuación no lineal a partir de datos experimentales [38], estudiando los comportamientos de losas micropiloteadas con y sin interacción directa en el suelo, los micropilotes se construyeron con diámetros de 25 y 50 mm proporción en longitud de máximo 40 veces su diámetro, configurados en cinco patrones diferentes de 1, 2, 4, 9 y 16 micropilotes. La carga soportada por la losa en contacto con el suelo es de aproximadamente 50 % más que la transportada por una losa sin contacto, lo anterior se debe al efecto de confinamiento producido por el terreno;

se determinó a partir de observaciones experimentales que la capacidad de carga de un grupo de micropilotes crece de una manera no lineal con el aumento del diámetro, la longitud, el número y el espaciado.

En Corea del Sur [39] se efectuaron pruebas de centrífuga en seis modelos a escala: con micropilotes convencionales, de inyección y cuatro especiales conocidos como de forma de onda, tres de ellos contaban con una llave de cortante que es un elemento estructural del mismo material del micropilote en forma de prisma hexagonal, construido en diferentes intersecciones con la finalidad de aumentar la capacidad de carga, tal y como se ve en la Figura 4.

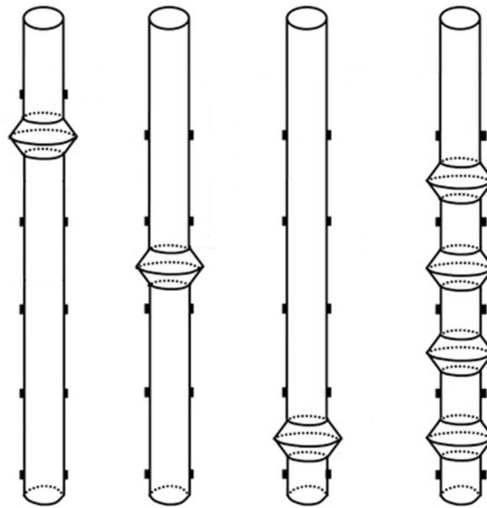


Figura 4. Estructura de micropilotes en forma de onda

Fuente: elaboración propia a partir de [39].

Todos los modelos tenían longitud estándar de 250 mm. Para los especiales, la llave se ubicó en distintas longitudes del micropilote (a 25 mm, a 100 mm y a 200 mm de la cabeza), el último cuenta con cuatro llaves distribuidas; estos modelos cuentan con dos diámetros, el del cuerpo del micropilote o del eje con 25 mm y 42 mm que es el diámetro para la llave cortante. La capacidad última de carga fue calculada mediante la curva de relación carga/asentamiento, de acuerdo con la FHWA este parámetro se calcula en el momento en que se alcanza 15 % de asentamiento; sin embargo, en los micropilotes tipo forma de onda se debe calcular al alcanzar un 10 % debido al diámetro adicional de la llave de cortante. Los resultados obtenidos fueron: 1.040 kN en el micropilote convencional, 1.981,7 kN para el inyectado, 2.079,8 kN para el micropilote con una llave de cortante en la parte superior, 2.059,2 kN en el construido con llave central, 2.208,8 kN para el de llave inferior, siendo este el que mostró los mejores resultados de capacidad última de carga y 2.167,1 kN en el micropilote que contaba con tres llaves.

En relación con el modelo convencional, la capacidad de carga del inyectado y de los que cuentan con llaves de cortante aumentó 47,5 % y 51,1 % en promedio respectivamente. Es de anotar que los resultados de los ensayos realizados en esta publicación evidencian un incremento en la capacidad de carga considerable, probado así mismo matemáticamente por una ecuación predictiva [40] en la

que se obtienen resultados similares a los encontrados en las pruebas in situ, por lo que podrían ser una de las mejores opciones como recuperadores de carga en grupos que presentan defectos.

Es así como se puede comprobar que a pesar de que los resultados de mejoras sean obtenidos mediante simulaciones y modelos matemáticos, como en el caso presentado por [33], o mediante pruebas de carga in situ, como en las demás publicaciones mencionadas, las mejoras en capacidad de carga tanto en tensión como en compresión gracias a los micropilotes nuevos son exitosas.

5.2. Esfuerzos axiales

A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos por diferentes autores en la variable de esfuerzos axiales de los micropilotes. En el primer caso se muestran los hallazgos de tres tipos de pruebas realizadas en centrífuga geotécnica [37], una prueba en un solo micropilote, otra en una losa con espesor de 0,6 m en escala prototipo y por último tres pruebas en grupos de micropilotes con losas de múltiples espesores, el diámetro prototipo fue de 150 mm y longitud de 10 m. La rigidez axial del micropilote individual de la losa con y sin micropilotes se evaluó a partir de las pendientes iniciales de las curvas de carga/asentamiento.

Se encontró que en el caso del micropilote individual era de 48.000 kN/m en la escala prototipo, para la losa sin micropilotes fue de 114.000 kN/m, finalmente en las pruebas de losas con micropilotes de espesor de 0,3 m, 0,45 m y 0,6 m fueron de 71.000 kN/m, 134.000 kN/m y 159.000 kN/m respectivamente. La rigidez de la losa se vio afectada principalmente por el espesor; los cálculos de rigidez axial de la losa con micropilotes de mayor espesor muestran que fue un 39 % más alta que la rigidez de la misma losa, pero sin micropilotes, lo que indica que cada micropilote contribuyó a aumentarla.

Por otro lado, en los ensayos en Shanghái (China) [31] se demostró que las distribuciones de fuerzas axiales en micropilotes crecen con las cargas aplicadas en las cabezas, pero disminuyen con la profundidad y la interacción suelo/micropilote. Existía una resistencia en punta en cargas axiales en todos los micropilotes con cargas en compresión, pero esta misma no se reflejaba bajo tensión. La reducción de las fuerzas axiales con la profundidad en micropilotes bajo tensión fue más significativa que bajo compresión, esta comparación se basó en las fuerzas medidas a profundidades de 5,5 y 8,0 m.

En Ontario (Canadá) se ejecutaron múltiples ensayos tanto in situ como en laboratorio para probar los micropilotes tipo barra hueca directamente en un enfoque evaluativo de esfuerzos axiales, construyendo cuatro grupos, cada uno compuesto con cuatro micropilotes y adicionalmente seis individuales, todos de longitud de 6 m con diámetros de 115 y 152 mm, espaciados entre 2 y 5 veces el diámetro [41]. Los resultados de cargas rápidas con incrementos del 5 % cada 5 min y las curvas de carga/desplazamiento mostraron que la rigidez promedio del grupo aumentó en aproximadamente un 50 % y en micropilotes individuales un 39 % debido a diámetros más altos de la broca (es decir, el diámetro del micropilote); en cuanto a la rigidez por espaciado, osciló entre 70.000 y 97.000 kN/m. Las cargas axiales se obtuvieron utilizando el área medida y el módulo de elasticidad equivalente, probando que la resistencia media de la punta representó aproximadamente el 12 % de la resistencia total de los micropilotes.

Para un estudio experimental sobre la respuesta de micropilotes de tornillo introducidos en el suelo por rotación aplicando simultáneamente torque y fuerza hacia abajo, se efectuaron tres pruebas de cargas axiales de tracción y dos de compresión [42]. Se realizaron 20 pruebas en tornillos con diámetro entre 66 y 114 mm, longitud variable de 0,8 a 1,6 m en suelos arcillosos de Italia. Las cargas fueron aplicadas con incrementos de 10 %, manteniéndose constantes de 2 a 13 horas. El hallazgo más interesante es que los micropilotes más cortos sometidos a cargas de tracción presentaron mayores valores de capacidad última de carga (15 a 33 %) en comparación con aquellos de carga compresiva, resultado opuesto a los micropilotes más largos, que alcanzaron valores de capacidad límite en promedio 35 a 50 % más altos en aquellos bajo cargas compresivas. Los micropilotes lograron capacidades de tracción y compresión al fallar en el rango de 23 a 60 kN y de 20 a 75 kN respectivamente. Los resultados de estos ensayos fueron muy similares en comparación con los analizados a profundidad de los micropilotes de tornillos y su respuesta frente a esfuerzos axiales [43].

En un caso especial de simulación de reforzamiento de fundaciones con micropilotes en túneles [44], se realizaron 13 pruebas a escala en cámara con arena densa; se demostró que con la instalación de micropilotes más largos principalmente ubicados en la sección central del túnel y cerca al pilote, disminuyeron significativamente los movimientos en el suelo en aproximadamente 86 %, los momentos de flexión en 25 % y las fuerzas axiales en 20 % en comparación con la situación sin micropilotes. Considerando que no se tiene certeza de la capacidad total exacta de los pilotes existentes y que se requiere que soporten el aumento de la carga estructural, es fundamental diseñar e instalar los micropilotes de refuerzo teniendo en cuenta la rigidez axial de los pilotes existentes y el índice de distribución de carga [45]. Partiendo de esta premisa se propone estimar la rigidez axial de los micropilotes de refuerzo a través de un programa numérico 3D conocido como YSPR y el software Plaxis 3D, en el que se simuló una remodelación de extensión vertical. La rigidez axial estimada en este análisis no se basó en el coeficiente de resorte sino en el módulo de elasticidad, realizando modelaciones bajo niveles de carga a 50 %, 100 % y 150 %, el índice de distribución del pilote existente disminuyó de 23,96 % a 23,47 % y a 22,81 %, por otro lado, este mismo aumentó de 4,16 % a 6,13 % y finalmente a 8,77 % en el micropilote de refuerzo. A partir de los resultados, se encontró que la carga estructural se transfiere al micropilote con una rigidez relativamente alta.

Las cargas axiales de los micropilotes convencionales pueden mostrar mejoría dependiendo de la metodología de construcción utilizada con el uso de micropilotes en forma de onda [39], [46], los cuales han demostrado óptimos resultados en capacidad de carga; lo que comprueba la transferencia de carga compartida completa al fuste y a la punta, demostrando que las cargas compartidas se comportan de manera diferente dependiendo de la ubicación de las llaves. Cuando estas llaves están construidas en la parte superior o central la resistencia del eje aumenta alrededor de la llave, debido a que la presión de confinamiento es relativamente baja. Los micropilotes no exhibieron una mejora significativa en las cargas axiales compartidas a nivel de eje respecto a los micropilotes inyectados, pero en resistencia en punta se pudo apreciar que el micropilote con llave central mostró una mejora considerable. Para el caso de los micropilotes que tienen la llave ubicada en la parte inferior, la resistencia en cargas axiales a nivel de eje es mayor, debido al nivel de confinamiento producido por la densidad del terreno, aunque su mejora en punta no sea tan alta como se esperaba. Por su parte, el micropilote con cuatro de estos elementos estructurales mostró similitud al micropilote con

llave inferior, lo que implica que el número de llaves de cortante no es el factor clave que afecta el aumento en la capacidad de soporte en micropilotes con forma de onda.

5.3. Asentamiento

Uno de los comportamientos de fundaciones que debe ser prioridad de análisis es el asentamiento, esta variable es la que nos garantizará la estabilidad de la estructura una vez el suelo complete sus niveles de consolidación; por este motivo existen varios estudios y pruebas enfocadas en la evaluación de resultados respecto al desplazamiento vertical y como, en la mayoría de los casos, los micropilotes pueden ser incluidos para mejorar esta condición. En los ensayos con centrifuga realizados con pruebas en losas con micropilotes [37] la flexibilidad de la misma se vio afectada principalmente por el espesor, influyendo en el asentamiento diferencial y la distribución de la carga entre la losa y los micropilotes. De acuerdo con el espaciado de los micropilotes se disminuirán las deflexiones, lo que se confirmó con una investigación numérica [47].

Las pruebas de asentamiento realizadas en los tres tipos de losas mostraron que en las más gruesas se generaba un comportamiento casi lineal. La más delgada presentó deformaciones que ocasionaron transferencia de cargas directamente al suelo desde la losa y no desde los micropilotes por la presión de contacto, lo que resultó en un aumento de la presión de confinamiento y en consecuencia la carga se transmitió a través de la sección superior de los micropilotes. En la etapa de carga inicial, la mayor parte de la carga era transportada por los micropilotes, a medida que aumentaba la proporción, la presión de contacto disminuyó significativamente. El aumento en la capacidad final de los micropilotes se atribuye al incremento de la presión de contacto de la losa, lo cual se presentó en la losa más flexible, aumentando la presión de confinamiento de los micropilotes. En las losas de mayores espesores, cuando la fuerza axial de los micropilotes alcanzó su carga final, se experimentó un asentamiento excesivo y no pudieron seguir soportando, así la carga transferida por la losa al suelo subyacente se incrementó, aumentando la presión de contacto.

En la ampliación vertical de un edificio se hace necesario el reforzamiento de los cimientos con el fin de compartir las cargas transmitidas, mitigando el asentamiento excesivo de la construcción. Basado en lo anterior se realizaron pruebas a escala en laboratorio de micropilotes convencionales y en forma de onda [48], analizando el factor de rigidez axial como parámetro de cálculo sobre el comportamiento de reparto de carga de pilotes existentes y micropilotes; los resultados llevaron a concluir que los elementos de forma de onda presentan una rigidez superior en comparación con los convencionales y, por tanto, los índices de asentamiento fueron menores y el grado de reducción aumentó linealmente con el incremento de la rigidez del micropilote, confirmando teorías ya expuestas.

En un tanque de prueba con una altura de 600 mm se efectuaron pruebas en una placa de acero con y sin micropilotes en terreno arcilloso de Malasia [49] con el fin de comprobar su efectividad al incluirlos en apuntalamiento de cimientos existentes, refuerzo de suelo in situ, reacondicionamiento sísmico y cimientos en nuevas construcciones. Para las pruebas en laboratorio se aplican cargas de 0,5 a 4,0 kg directamente sobre la placa y luego sobre la cabeza de los elementos de refuerzo instalados. En el primer caso la placa presentó un asentamiento excesivo, mientras que en la placa con micropilotes el asentamiento disminuyó; esta variación es aún más obvia al aumentar la cantidad de los micropilotes, teniendo en cuenta la profundidad y el espaciado entre ellos.

En la construcción de un túnel de dos carriles reforzado con micropilotes en Teherán (Irán) [50], se simuló por medio de Plaxis 2D la proyección del asentamiento de superficie; de acuerdo a los resultados se esperaba que los elementos recuperadores de carga redujeran el asentamiento un 30 %. Una vez iniciada la ejecución de la obra, se recolectaron datos en tiempo real, hallando que la mejora fue únicamente del 15 %; es decir, la mitad de lo proyectado; esto debido a que en algunas secciones del terreno que revestía el túnel los parámetros geotécnicos demostraban que la capacidad portante del suelo era mucho menor, haciendo que la eficacia de los micropilotes no alcanzara su máximo nivel.

En Jumunjin (Corea del Sur), bajo pruebas realizadas a escala e in situ, se midió el asentamiento de los micropilotes en varias configuraciones [34]. Las mediciones de las pruebas se realizaron en diferentes niveles de asentamiento para cada tipo de instalación, apreciando la influencia del ángulo de inclinación. Para el caso de los micropilotes individuales y el grupo, en el momento en que llegaron a un punto de asentamiento óptimo, no se mostraron cambios significativos en la capacidad de carga, mientras que para la placa con micropilotes se incrementó continuamente sin una clara indicación de falla, lo que es consecuente con ensayos efectuados posteriormente que indicaron que la losa tenía un efecto fundamental en el asentamiento [31]. Con base en lo anterior, se midió el factor de interacción de las losas con micropilotes, como resultado se halló que dicho factor generalmente estaba por debajo de 1 para los asentamientos alrededor del 10 % del ancho de la losa; de igual manera se evidenció que en las losas donde el espaciado de micropilotes es mayor, el factor de interacción muestra valores más altos, ya que el efecto de grupo se desvanece.

Los valores de la relación de cargas compartidas en esta configuración fueron más altos inicialmente, lo que indicaba más proporción de carga transportada por los micropilotes a medida que aumentaba el asentamiento; también se observó que la proporción de dicha carga aumentaba cuando el espaciado entre ellos era mayor en las inclinaciones de 15° a 30°, excepto en el caso de espaciado de tres veces el diámetro. Con esta publicación y sus comparaciones con los resultados obtenidos por otros autores es posible concluir que el asentamiento es una variable importante a la hora de medir el comportamiento de los micropilotes instalados de manera vertical y también aquellos que poseen cierto grado de inclinación.

La técnica de inclusión de micropilotes para control de asentamiento y recuperación de carga fue utilizada en Egipto [51] en un edificio construido en 2013 con altura de 10 pisos incluido el sótano, tiempo después agregaron tres niveles adicionales provocando un hundimiento desproporcional por cargas excesivas. Instalaron 36 micropilotes de 150 mm y 13 m de longitud que proporcionaron una capacidad de carga de 720 toneladas, que permitieron la estabilización de la estructura; se verificó el comportamiento de instalación monitoreando su desempeño por un año, tres meses después de la intervención se logró detener por completo el asentamiento.

En Lianyungang (China), una torre de transmisión construida sobre suelo arcilloso blando que por sobrecarga inducida generó un asentamiento diferencial respecto al diseño inicial de la cimentación [52] se intervino con la instalación de 12 micropilotes de 102 mm de diámetro y 12 m de largo para contrarrestar su inclinación, la base de la zapata se maniobró utilizando gatos hidráulicos que permitieron elevar la torre de manera segura; una vez nivelada, se fijó la nueva posición de la base con pernos de alta resistencia que se unirían a los micropilotes fundidos, adicionalmente el

espacio entre el suelo y la cimentación corregida fue llenado con hormigón, ampliando la cimentación inicial. Los datos finales de seguimiento del desplazamiento y la carga aplicada confirmaron que el micropilote inyectado es una buena opción para la rectificación y el refuerzo de la cimentación, especialmente en terrenos blandos y espacios físicos reducidos.

La variable de asentamiento fue analizada en cuatro puentes reforzados con micropilotes en los condados de Salem y Gloucester en Nueva Jersey (Estados Unidos) [53], estos viaductos contaban con pilotes de hormigón octagonales. Se realizó la construcción de cuatro a ocho micropilotes en secciones de cuatro a ocho, para reducir los índices de asentamiento una vez se instalarán en las fundaciones existentes. La carga de compresión de diseño para los micropilotes fue de 356 kN, se construyeron utilizando una tubería de acero con un grosor de pared de 13 mm, con perforaciones internas de 130 mm para el primer y segundo puente, de 150 mm para el tercer puente y 190 mm para el último. En cada puente se instalaron pilas de prueba y se realizaron pruebas de carga de compresión estática de hasta 2,5 veces la carga de diseño.

Todos los micropilotes fueron precargados. El principal parámetro exigido por el área de diseño era que los micropilotes deberían sostener la carga total de compresión, es decir, 356 kN con no más de 25,4 mm de asentamiento. Una vez realizadas las primeras pruebas, se obtuvo que, en el primer puente cargado con 890 kN, el máximo asentamiento alcanzado fue de 5,8 mm, cumpliendo con el estándar establecido. En el caso del segundo puente los micropilotes cargados presentaron un fallo antes de completar la carga máxima, por lo cual debieron incrementar el diámetro de la perforación de 130 a 190 mm, de esta manera cumplieron con el margen de carga máxima, siendo que el mayor asentamiento presentado en este puente fue de 14,05 mm. En el tercer puente nuevamente se presentó un fallo, por lo que se recurrió al cambio de diámetro de perforación, pasando de 150 a 190 mm. Los fallos en estos dos puentes fueron atribuidos principalmente al tipo de suelo y a que en el primer puente la longitud de enlace en la parte inferior del mismo era de 9,1 m mientras que para los demás puentes era de 12,2 m. Una vez modificado el diámetro de perforación, los micropilotes soportaron la carga sin inconveniente, obteniendo un máximo asentamiento de 10,92 mm en promedio.

Este caso demuestra que tanto el diámetro de los micropilotes como su longitud son características importantes a la hora del diseño, conclusión compartida en las pruebas realizadas para el mejoramiento de una línea ferroviaria en Alberta (Canadá) [54], donde los micropilotes se convirtieron en una solución viable para cimentaciones profundas en grandes proyectos de transporte, disminuyendo en gran medida los índices de asentamiento sin alcanzar el parámetro máximo permitido de 25 mm; fue evidente su funcionalidad al ser usados como elementos recuperadores de carga. A pesar de que en estos casos no se mostraban fallos en su estructura de cimentación y que las intervenciones se hicieron con el fin de prevención, son los que más se acercan al objetivo de análisis de los micropilotes como elementos recuperadores de carga en fundaciones que presentan defectos con resultados positivos.

5.4. Otras variables

Las variables recopiladas previamente: capacidad de carga, esfuerzos axiales y asentamiento, fueron estudiadas y discutidas en aproximadamente el 90 % de las publicaciones consignadas en

este artículo. El 10 % restante consideran variables diferentes a las tres mencionadas, enfocadas a otros objetivos. La variable de pandeo fue calculada considerando las densidades de los estratos de suelo [11], hallando medidas de tensión, compresión y flexión para secciones específicas del micropilote y no de la longitud total del mismo, otra variable es la resistencia lateral para micropilotes individuales y en grupo simulada en software especializado (COM 624P - LPILE).

Para los micropilotes “Alluvial Anker” [30] las variables de carga de ruptura y carga de trabajo fueron halladas mediante extrapolación de modelos matemáticos. La variable presión de poro fue analizada en la zona arcillosa del valle de México por la generación de un modelo hiperbólico basado en los modelos de Mohr-Coulomb y Tresca, determinando adicionalmente presión inicial, máxima expansión y radio de la zona plástica [55]. La resistencia de fricción se determinó a partir del coeficiente de presión de tierras [33] para conocer la cantidad de micropilotes a instalar.

Las cargas críticas se estudiaron para el caso de expansión del Coliseo Fort Worth en Texas (Estados Unidos) [56], donde se utilizaron micropilotes como reforzamiento temporal de la cúpula durante el proceso de demolición de la estructura adyacente, dichos análisis resultaron indiferentes por tratarse de estudios temporales; sin embargo, demostraron que los micropilotes junto con otros elementos proporcionaron una resistencia en carga suficiente para el proyecto. El compendio de las variables de enfoque evaluadas en este artículo se evidencia en la Figura 5.

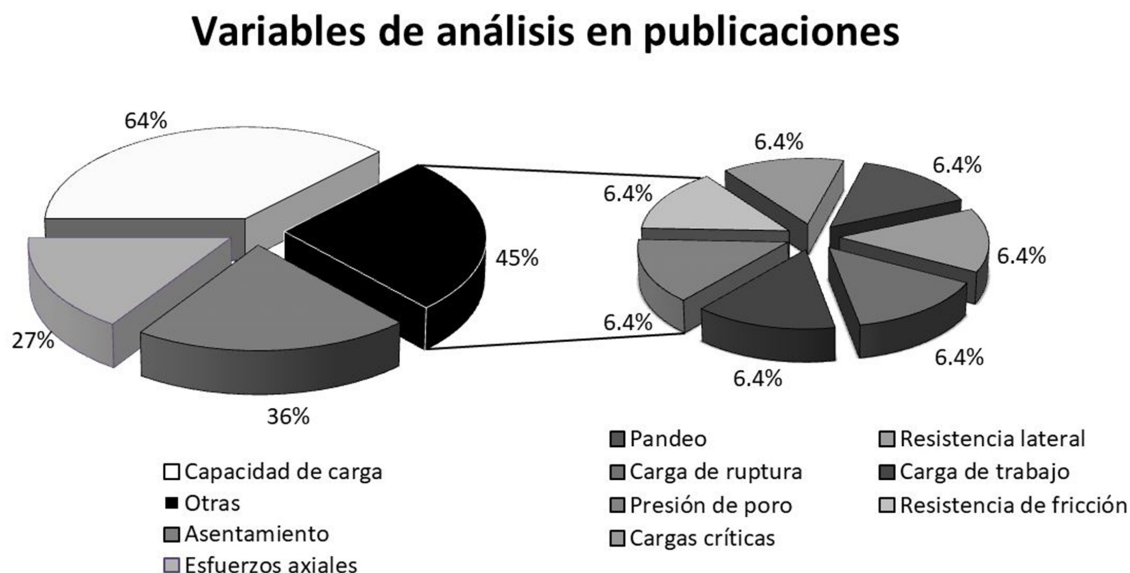


Figura 5. Porcentaje de variables analizadas en investigaciones consultadas

6. Conclusiones

En el refuerzo de cimentaciones de estructuras existentes los micropilotes pueden ser considerados una de las mejores opciones a razón de sus particularidades constructivas, su contribución geotécnica y su relación costo/beneficio en comparación con otras técnicas convencionales; con el paso del tiempo esta técnica se ha implementado en mayor medida haciendo que sus aplicaciones

pasen por el apuntalamiento de cimientos, el refuerzo de suelo in situ, el reacondicionamiento sísmico y el soporte estructural; partiendo de ello se empieza a contemplar la opción de utilizar los micropilotes como elementos recuperadores de carga en cimentaciones defectuosas.

Este artículo hace una revisión de los parámetros que se tienen en cuenta al medir la efectividad de esta práctica, encontrando que las variables de mayor incidencia son la capacidad de carga (siendo esta la más analizada, encontrándose en el 64 % de los manuscritos referenciados), el asentamiento que aparece en el 36 % y los esfuerzos axiales en el 27 %, aunque de igual forma se evalúan otras tales como el pandeo, la resistencia lateral, la carga de ruptura y algunas otras específicas de cada artículo.

Los hallazgos expuestos en los diferentes documentos de esta compilación lograron comprobar que los micropilotes tienen una influencia positiva en la recuperación de carga para fundaciones existentes; la capacidad aumenta con la inclusión de los micropilotes y la proporción de cargas compartidas presenta una mejor distribución, garantizando que todos los elementos de la fundación trabajen de manera adecuada y óptima.

Los esfuerzos axiales exhiben una relación directa entre suelo y micropilote, lo que permite que las cargas sean transferidas de mejor manera, tanto en punta como en fuste; lo anterior en consecuencia con la rigidez y la longitud de los micropilotes que se construyan.

En el caso del asentamiento la disminución de este índice es indiscutible, principalmente en configuraciones grupales con espaciamiento de aproximadamente dos veces su diámetro y que presenten ángulos de inclinación; es importante hacer alusión a la estratificación del suelo, puesto que es un factor que repercutirá en criterios de diseño y construcción.

Las investigaciones consultadas, a pesar de que resaltan estos elementos como recuperadores de carga en diferentes tipos de suelos, no han sido realizadas considerando los estratos específicos que pudiesen encontrarse en terreno colombiano, por lo que es necesario que la academia contribuya a reunir los conocimientos empíricos con los que actualmente se ejecutan proyectos de esta índole y genere una base conceptual de soporte, que detalle los aspectos técnicos y constructivos de los micropilotes en reforzamiento de cimentaciones profundas.

A partir del conocimiento obtenido con esta revisión, se considera importante llevar a cabo estudios tanto en laboratorio como en campo que prioricen la variedad granulométrica de la geografía nacional, para que de esta manera se reduzca la incertidumbre del uso de esta práctica, y por ende aumente y se incentive el manejo de la técnica bajo las condiciones geotécnicas del país, aprovechando los beneficios que brinda; por otro lado es trascendental un análisis minucioso que evalúe a nivel presupuestal la utilidad de esta técnica frente a las soluciones convencionales en cimentación profunda.

Referencias

- [1] D. A. Bruce, A. F. DiMillio, and I. Juran, "Micropiles: The state of practice. Part I characteristics, definitions and classifications", *Ground Improv*, vol. 1, no. 1, pp. 25-35, 1997. <https://doi.org/10.1680/gi.1997.010104> ↑2, 4, 5

- [2] A. Cadden, J. Gómez, D. A. Bruce, and T. Armour, "Micropiles: Recent advances and future trends", *Current Practices and Future Trends in Deep Foundations*, pp. 140-165, 2004. [https://doi.org/10.1061/40743\(142\)9](https://doi.org/10.1061/40743(142)9) ↑2, 7
- [3] I. Juran, D. A. Bruce, A. DiMillio, and A. Benslimane, "Micropiles: The state of practice. Part II: Design of single micropiles and groups and networks of micropiles", *Ground Improv.*, vol. 3, no. 3, pp. 89-110, 1999. ↑2, 8
- [4] V. Rama, "Pile foundations", *Geotechnical Engineering*, vol. 1, no. 46, pp. 76-85, 2009. ↑2, 10
- [5] B. M. Das, *Principios de ingeniería de cimentaciones*, Cuarta edición, International Thomson Editores, 1999. ↑2, 7
- [6] Ministerio de Fomento, Secretaria de Estado de Planificación e Infraestructuras y Dirección General de Carreteras, *Guía de cimentaciones en obras de carreteras*, Gobierno de España, Madrid: 2009. ↑4, 6
- [7] D. A. Bruce, A. F. DiMillio, and I. Juran, "A primer on micropiles", *Civil Engineering - ASCE*, vol. 65, no. 12, pp. 51-54, 1995. ↑4
- [8] R. Lorente, *Ejecución de micropilotes en recalce de cimentaciones*, (Tesis de grado), Escuela de ingeniería y Arquitectura de Edificación, Universidad Politécnica de Cartagena, España, 2013. ↑5, 6
- [9] Federal Highway Administration - National Highway Institute, *Micropile Design and Construction. Reference Manual*, U.S. Department of Transportation, 2005. ↑6, 8, 10
- [10] C. Viggiani, A. Mandolini, and G. Russo, *Piles and Pile Foundations*, United States of America: Spon Press, 2012. ↑8, 10
- [11] D. A. Bruce, A. W. Cadden and P. J. Sabatini, "Practical advice for foundation design - Micropiles for structural support", *Contemporary Issues in Foundation Engineering*, 2005. [https://doi.org/10.1061/40777\(156\)14](https://doi.org/10.1061/40777(156)14) ↑11, 12, 20
- [12] L. Shaw, and F. Chew, "Design & construction of micropiles", *Geotechnical Course for Pile Foundation Design & Construction*, 2003. ↑9
- [13] I. Juran, G. Weinstein, and L. Sourisseau, *Forever: Synthesis of the results of the national project on micropiles* (Research Report), 2002. ↑9
- [14] B. Sharma, S. Sarkar, and Z. Hussain "A study of parameters influencing efficiency of micropile groups", *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics*, vol. 14, pp. 11-18, 2019. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0559-7_2 ↑9
- [15] H. Wang, D. Zhou, and T. Ma, "Pile group efficiency of micropile structure", *Third International Conference on Transportation Engineering (ICTE)*, Chengdu, China, 2011. [https://doi.org/10.1061/41184\(419\)335](https://doi.org/10.1061/41184(419)335) ↑9
- [16] N. Gogoi, S. Bordoloi, and B. Sharma, "A model study of micropile group efficiency under axial loading condition", *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 5, no. 4, pp. 323-332, 2014. ↑9
- [17] B. Sharma and P. Buragohain, "Behaviour of micropile groups under oblique pull out loads in sand", *Indian Geotech. J.*, vol. 44, pp. 400-408, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40098-013-0091-1> ↑9
- [18] B. Vani, and P. D. Arumairaj, "Evaluation of settlement and load carrying capacity of footing with micropiles on sand", *Int. J. of Sci. Res.*, vol. 4, no. 6, pp. 44-46, 2015. ↑9
- [19] S. Jose, V. M. Prakash, and H. Paul "A model study on lateral behaviour of micropile under inclined compressive loads in sand", *Int. Res. J. Eng. and Tech.*, vol. 05, no. 4, pp. 2946-2950, 2018. ↑9
- [20] S. D. Manfred, "Numerical study on the behavior of inclined micropiles", *Proceedings of the 37th Annual Conference on Deep Foundations*, Houston, 2012. ↑9
- [21] A. K. Theinat, *3D numerical modelling of micropiles interaction with soil & rock* (Master Thesis), Faculty of the Graduate School, Missouri University of Science and Technology, United States of America, 2015. ↑9
- [22] A. K. Theinat, and R. Luna, "Load transfer mechanism of micropiles in weathered rock", *Geo-Congress*, 2019. <https://doi.org/10.1061/9780784482094.006> ↑9
- [23] A. L. Kouby, J. C. Dupla, J. Canou, and R. Francis, "The effects of installation order on the response of a pile group in silica sand", *Soil and Foundation*, vol. 56, no. 2, pp. 174-188. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.02.002> ↑9
- [24] D. A. Bruce, "American developments in the use of small diameter inserts as piles and insitu reinforcement", *Deep Foundation Institute*, vol. 26, pp. 11-22, 1988. ↑9
- [25] D. A. Bruce, I. Juran, and A. F. DiMillio, "High capacity grouted micropiles: The state of practice in the United States", *15th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Istanbul, 2004. ↑10
- [26] D. A. Bruce, "High capacity pinpiles for structural underpinning", 1992. ↑10, 11
- [27] C. Kolev, "Tilting prevention of a four floor residential building with the assistance of micro-piles beneath the

- foundation”, 12th ISM Workshop, Poland, 2014. ↑10
- [28] K. Sternik, and T. Blejarski, “Application of micropiles to the stabilization of a deflected old tenement house”, 12 th ISM Workshop, Poland, 2014. ↑11
- [29] W. L. Snow, W. B. Wright, and W. Snow “Support of the Morris Island lighthouse using micropiles”, *13th International Workshop on Micropiles*, Canada, 2017. ↑11
- [30] C. Mendoza, R. Pinto, J. Ruge y N. Silveira, “Estudio de sistema placa-pilote con micropilotes de refuerzo auto-perforante”, *XIV Congreso Colombiano de Geotecnia y IV Congreso Suramericano de Ingenieros Jóvenes Geotécnicos*, Bogotá: Sociedad Colombiana de Geotecnia, pp. 285-292, 2014. ↑12, 20
- [31] J. Han, and S-L. Ye, “A field study on the behavior of micropiles in clay under compression or tension”, *Can. Geotech. J.*, vol. 43, no. 1, pp. 19-22, 2011. <https://doi.org/10.1139/t05-089> ↑12, 15, 18
- [32] J. Han, and S-L. Ye, “A field study on the behavior of a foundation underpinned by micropiles”, *Can. Geotech. J.*, vol. 43, no. 1, pp. 30-42, 2011. <https://doi.org/10.1139/t05-087> ↑12
- [33] B. Sivakumar, G. L. Srinivasa, B. Murthy, and D. S. N. Nataraj, M. S. “Bearing capacity improvement using micropiles: A case study”, *GeoSupport Conference*, 2004. [https://doi.org/10.1061/40713\(2004\)14](https://doi.org/10.1061/40713(2004)14) ↑12, 15, 20
- [34] D. Kyung, D. Kim, G. Kim, and J. Lee, “Vertical load carrying behavior and design models for micropiles considering foundation configuration conditions” *Can. Geotech. J.*, vol. 54, no. 2, pp. 234-347, 2016. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0472> ↑12, 18
- [35] V. Farhangi, and M. Karakouzian, “Design of bridge foundations using reinforced micropiles”, *International Road Federation Global R2T Conference & Expo*, Las Vegas, Nevada, USA, 2019. ↑13
- [36] Y. Tsukada, K. Miura, Y. Tsubokawa, Y. Otani, and G.-L. You, “Mechanism of bearing capacity of spread footings reinforced with micropiles” *Soils Found*, vol. 46, no. 3, pp. 367-376, 2006 <https://doi.org/10.3208/sandf.46.367> ↑13
- [37] A. M. Alnuaim, H. El Naggar, and M. H. El Naggar “Performance of micropiled raft in sand subjected to vertical concentrated load: Centrifuge modeling”, *Can. Geotech. J.*, vol. 52, no. 1, pp. 33-45, 2015. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0001> ↑13, 15, 17
- [38] N. Borthakur, and A. K. Dey, “Experimental investigation on load carrying capacity of micropiles in soft clay”, *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 43, pp. 1969-1981, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2894-3> ↑13
- [39] Y-E. Jang, and J-T. Han, “Analysis of the shape effect on the axial performance of a waveform micropile by centrifuge model tests”, *Acta Geotech.*, vol. 14, pp. 505-518, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11440-018-0657-2> ↑14, 16
- [40] Y-E. Jang, B. Kim, C. Wang, and J-T. Han, “Prediction of vertical bearing capacity of waveform micropile”, *Géotechnique Letters*, vol. 9, no. 3, pp. 198-204, 2019. <https://doi.org/10.1680/jgele.18.00209> ↑14
- [41] M. A. Abdllrahem, and M. H. El Naggar, “Axial performance of micropile groups in cohesionless soil from full-scale tests”, *Can. Geotech. J.*, vol. 57, no. 7, 2020. <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0695> ↑15
- [42] A. Sanzeni, and E. G. Danesi, “Behaviour of screw micropiles subjected to axial tensile and compressive loading”, *J. Geotech. Eng.*, 2019. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1673952> ↑16
- [43] Z. Guo, and L. Deng, “Field behaviour of screw micropiles subjected to axial loading in cohesive soils”, *Can. Geotech. J.*, vol. 55, no. 1, pp. 34-44, 2018. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0109> ↑16
- [44] H. Sohaei, E. Namazi, and A. Marto, “Control of pile movements induced by tunnelling using micropiles”, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, vol. 18, no. 4, pp. 191-207, 2018. <https://doi.org/10.1680/jphmg.16.00065> ↑16
- [45] D. Kim, J. Kim, and S. Jeong, “Estimation of axial stiffness on existing and reinforcing piles in vertical extension remodeled buildings”, *Eng. Struct.*, vol. 199, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109466> ↑16
- [46] Y-E Jang, and J-T. Han, “Field study on the axial bearing capacity and load transfer characteristic of waveform micropile”, *Can. Geotech. J.*, vol. 55, no. 5, pp. 653-665, 2017. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0155> ↑16
- [47] A. M. Alnuaim, M. H. El Naggar, and H. El Naggar, “Performance of micropiled rafts in clay: Numerical investigation”, *Comput. Geotech.*, vol. 99, pp. 42-54, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.02.020> ↑17
- [48] C. Wang, J-T. Han, and Y-E Jang, “Experimental investigation of micropile stiffness affecting the underpinning of an existing foundation”, *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 12, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9122495> ↑17

- [49] Lekshmi, R. Chacko, S. Vinod, T. Jose, and J. G. Philip, “Effect of micropile on foundation settlement”, *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 07, no. 5, pp. 7375-7378, 2019 ↑17
- [50] A. Golshani, M. G. Varnusfaderani “Innovative design modification during construction of a twin tunnel using real-time field data”, *Transp. Geotech.*, vol. 20, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100254> ↑18
- [51] R. Bakr “Using the micropiles technique as a settlement control tool in the underpinning of limited headroom cases”, *Fourth Geo-China International Conference, Shandong, China*, 2016. ↑18
- [52] L. Wen, G. Kong, H. Abuel-Naga, Q. Li, and Z. Zhang, “Rectification of tilted transmission tower using micropile underpinning method”, *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 34, no. 1, 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001398](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001398) ↑18
- [53] K. Larsson, and D. Jog, “Performance of micropiles used to underpin highway bridges”, *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 28, no. 3, 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000426](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000426) ↑19
- [54] O. Kacar, A. Cushing, and M. R. Lewis, “High-capacity micropiles in Edmonton shale”, *Eighth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Philadelphia, Pennsylvania, 2019. <https://doi.org/10.1061/9780784482094.029> ↑19
- [55] R. Ortiz y E. Ovando, “Desarrollo de presión de poro y consolidación alrededor de micropilotes inyectados en suelos blandos”, *e-Gnosis*, vol. 7, no. 5, 2009. ↑20
- [56] J. H. Edens, and B. L. Fisher, “Foundation retrofit of three structures utilizing micropiles”, *Structures Congress*, 2018. <https://doi.org/10.1061/9780784481325.041> ↑20

Wendy Madeleyne Castellanos Guerrero

Ingeniera Civil de la Universidad Militar Nueva Granada, Tecnólogo en Topografía; investigador del grupo Modelos de Simulación ICDIST.

Correo electrónico: d7303309@unimilitar.edu.co

Edgar Rodríguez Rincón

Doctor en Ingeniería Geotécnica de la Universidad de Brasilia. Magíster en Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes. Profesor asistente de la Universidad Militar Nueva Granada y profesor parcial de la Universidad Nacional de Colombia. Investigador del grupo Modelos de Simulación ICDIST.

Correo electrónico: edgar.rodriguez@unimilitar.edu.co