



Revisión Bibliográfica del uso de micropilotes: Consideraciones geotécnicas y constructivas.

Jerson Yesid Ortiz Jimenez

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Análisis y Diseño de Estructuras

Asesor

Cristian Camilo Londoño Piedrahita

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	(Ortiz Jimenez, 2024)
Referencia	Ortiz Jimenez, J. Y (2024). <i>Revisión bibliográfica del uso de Micropilotes: Consideraciones geotécnicas y constructivas</i> . Trabajo de grado especialización. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras, Cohorte XI.



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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

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.

Dedicatoria

A Dios, familia y amigos.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme lo que requerí para sobrepasar toda esta temporada, por hacerme fuerte y capaz. A mi madre que siempre ha sido el refugio en tiempos duros, su calidez siempre me acompaña y me hace ser un ser mas fuerte, casi como ella lo es.

A mi otra madre Victoria que me cuida, me ama y me ha abierto sus brazos en un lugar que no me siento merecedor, pero ella se ha percatado que así sea.

A mis hermanos de sangre, Jeffer, Jennifer, George, que son mi más hermosa inspiración para seguir los amo, a mis hermanos de vida que los amo, que me han hecho parte de ellos, Kelly, Liz y Santi.

A mi mejor amigo Santiago por cuidarme y levantarme los brazos cuando me he sentido cansado.

A mi otro Santiago que siempre me escucha y me aconseja.

A mis mejores amigas, Caro, Vane que amo con mi vida entera, a Carito que ha sido un amor tan lindo, un amor que me ha cuidado, a Sara porque siempre ha estado pendiente de mí.

A mis amigos Javier, y Deimer porque nunca me han dejado bajar la guardia.

A mi ángel lindo Yesica que sin ella no hubiese podido terminar esto.

Tabla de contenido

Revisión Bibliográfica del uso de micropilotes: Consideraciones geotécnicas y constructivas.	1
Tabla de contenido	4
Resumen	7
Abstract.....	8
Motivación.....	9
Objetivos.....	10
Introducción.....	11
Marco Teórico	13
Definición General de Micropilotes:.....	13
Caracterización de suelos y Propiedades Geotécnicas.	14
Comportamiento Sísmico e interacción suelo estructura	20
Técnicas de Construcción y Métodos de supervisión	27
Metodología.....	36
Fuentes y criterios de selección:.....	36
Fuentes consultadas.	36
Criterios de selección.	37
Parámetros principales de análisis.....	38
Alcance de la revisión bibliográfica.....	38
Limitaciones.	39
Estado del arte	40
Implementaciones Históricas y Globales.	41
Análisis crítico de los avances normativos	42
Comparación de enfoques: Casos en Colombia y el mundo.....	43
Impacto y desafíos en la ingeniería moderna.	44
Conclusiones.....	48

Referencias50

Lista de tablas

Tabla 1. Mecanismos de transferencia de carga en micropilotes y casos de aplicación.....	18
Tabla 2. Detalles de la Clasificación de Micropilotes Basada en el Tipo de Inyección de Lechada.....	29
Tabla 3. Parámetros normativos.	34
Tabla 4. Cronología del desarrollo.	41
Tabla 5. Cronología del desarrollo.	42

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Esquema Detalle ilustrativo micropilotes.....	14
Ilustración 2. Esquema de puente Vasco de Gama (Portugal)	16
Ilustración 3. Configuración típica de transferencia de carga en Pilas y Micropilotes.	17
Ilustración 4. Curva P-Y de Pilote sometido a carga vertical y horizontal.....	19
Ilustración 5. Asentamiento y asentamientos diferenciales.	22
Ilustración 6. Caso ejemplo de asentamiento diferencia en edificación.	23
Ilustración 7. Comparación de sistemas sin micropilote y con micropilotes.	23
Ilustración 8. Esquema de modelo de uso de micropilotes en escenarios complejos.	26
Ilustración 9. Clasificación de Micropilotes según sistema de construcción.....	28
Ilustración 10. Micropilotes como refuerzo a cimentaciones existentes.....	30
Ilustración 11. Micropilotes como refuerzo a cimentaciones existentes en zonas urbanas.	31
Ilustración 12. Mecanismos de Resistencia para cimentaciones con Micropilotes.....	31
Ilustración 13. Configuración típica para prueba de carga.	34
Ilustración 14. Disposición para la Prueba de Carga Lateral (ASTM D1143).	35

Resumen

Los micropilotes son una solución esencial en el campo de las cimentaciones profundas, particularmente en terrenos con baja capacidad portante o condiciones adversas como zonas sísmicas y áreas propensas a la socavación. Este trabajo se enfoca en un análisis geotécnico y constructivo de los micropilotes, abordando aspectos como los mecanismos de transferencia de carga (fricción lateral y soporte en punta) y las interacciones suelo-estructura que aseguran su estabilidad y desempeño.

Se revisan también las principales técnicas constructivas empleadas en la instalación de micropilotes, incluyendo métodos de perforación y sistemas de inyección controlada, resaltando su importancia en proyectos donde las condiciones del terreno presentan desafíos significativos. Adicionalmente, se incluirán casos de ejemplo que ilustran la aplicación de los micropilotes en contextos prácticos, tanto a nivel nacional como internacional.

El objetivo es ofrecer una perspectiva integral de los fundamentos geotécnicos y las prácticas constructivas que han posicionado a los micropilotes como una herramienta versátil y eficiente en la ingeniería civil moderna.

Palabras clave: Pilotes, micropilotes, cimentaciones profundas, capacidad portante, fricción negativa, interacción suelo estructura, diseño sísmico.

Abstract

Micropiles are an essential solution in the field of deep foundations, particularly in soils with low bearing capacity or adverse conditions such as seismic zones and areas prone to scour. This study focuses on a geotechnical and construction analysis of micropiles, addressing aspects such as load transfer mechanisms (lateral friction and end bearing) and soil-structure interactions that ensure their stability and performance.

The review also examines the main construction techniques used in the installation of micropiles, including drilling methods and controlled injection systems, highlighting their importance in projects where challenging soil conditions prevail. Additionally, examples of practical applications of micropiles, both nationally and internationally, are presented to illustrate their versatility.

The objective is to provide a comprehensive perspective on the geotechnical fundamentals and construction practices that have positioned micropiles as a versatile and efficient tool in modern civil engineering.

Keywords: Piles, micropiles, deep foundations, bearing capacity, negative skin friction, soil-structure interaction, seismic design.

Motivación

En el ámbito de la ingeniería estructural y geotécnica, la toma de decisiones fundamentadas depende en gran medida de la calidad y claridad de la información técnica disponible. Los micropilotes, como solución de cimentación profunda, presentan retos y oportunidades únicos que requieren no solo un entendimiento de su desempeño geotécnico, sino también de las implicaciones constructivas que aseguran su funcionalidad.

Este trabajo se plantea como una revisión bibliográfica que no busca generar nuevas teorías ni desarrollar diseños específicos, sino consolidar y analizar la información existente desde una perspectiva aplicada. Al estudiar escenarios geotécnicos como suelos licuables, blandos o erosionables, y conectar estos análisis con técnicas constructivas probadas, se pretende ofrecer una herramienta técnica de consulta para diseñadores estructurales y geotécnicos.

La motivación principal radica en aportar claridad a los factores geotécnicos y constructivos que hacen de los micropilotes una solución viable, asegurando que la selección e implementación de estas cimentaciones profundas no solo cumplan con las normativas, sino que también se ejecuten de manera eficiente y segura. Esta revisión busca convertirse en una referencia práctica y accesible para profesionales que enfrentan decisiones técnicas complejas en el contexto de proyectos reales.

Objetivos

Presentar una revisión sobre los aspectos geotécnicos y constructivos de los micropilotes como solución en cimentaciones profundas, evaluando escenarios representativos y las técnicas de construcción más relevantes para garantizar su desempeño y estabilidad en proyectos de ingeniería.

Objetivos específicos

- Analizar la caracterización de los suelos y sus propiedades geotécnicas relevantes para el uso de micropilotes, identificando los tipos de terrenos más comunes donde se implementan y su influencia en la estabilidad de las cimentaciones profundas.
- Examinar el comportamiento sísmico de los micropilotes y su interacción con el suelo, evaluando su capacidad para mitigar riesgos asociados a licuefacción, asentamientos diferenciales y cargas dinámicas en zonas de alta actividad sísmica.
- Explorar las principales técnicas constructivas y métodos de supervisión constructivos empleados en la instalación de micropilotes, destacando las mejores prácticas para garantizar la calidad y seguridad durante su ejecución en proyectos reales.

Introducción

Los micropilotes han evolucionado como una solución clave en el diseño y construcción de cimentaciones profundas, especialmente en terrenos con condiciones geotécnicas adversas. Estos elementos son esenciales para garantizar la estabilidad estructural en suelos con baja capacidad portante, áreas propensas a licuefacción o socavación, y regiones de alta actividad sísmica. En este contexto, una revisión bibliográfica de los aspectos geotécnicos y constructivos resulta indispensable para comprender su implementación y desempeño.

Se abordará la revisión desde el punto de vista geotécnico basados principalmente en los estudios de Indraratna et al. (2015) en conjuntos de otros autores, los cuales describen las principales propiedades del suelo que deben ser revisadas antes de la instalación del sistema de mejoramiento y cimentación con micropilotes y destacan la importancia de la instalación de este mecanismo como mejoramiento, especialmente en suelos blandos y licuables, por su parte, Craig (2022) brindará información sobre la interacción suelo-estructura, destacando cómo las cargas laterales y dinámicas afectan el comportamiento de las cimentaciones profundas y su capacidad de disipar energía en escenarios sísmicos, con respecto a las buenas prácticas de construcción, El Eurocódigo 7 (última versión) proporciona directrices específicas para cimentaciones profundas, haciendo énfasis en el diseño basado en estados límite y la caracterización del suelo para garantizar la estabilidad que complementando así las tres visiones principales de esta revisión bibliográfica.

La transferencia de cargas en micropilotes, tanto por fricción lateral como por soporte en punta, ha sido analizada ampliamente en la literatura, destacándose estudios como el de Day (2009), que documenta la relación entre las propiedades del terreno y la capacidad portante. Adicionalmente, los lineamientos del FHWA (2017) ofrecen una guía actualizada para garantizar que los micropilotes cumplan con los requisitos geotécnicos y constructivos en proyectos modernos, incluyendo recomendaciones para zonas sísmicas.

En cuanto a los métodos constructivos, la implementación de técnicas avanzadas como los sistemas autoperforantes y la inyección secuencial controlada (FHWA, 2000) ha permitido optimizar la capacidad portante y reducir el impacto en el suelo circundante. Además, los métodos de supervisión durante la instalación, descritos por Vieco Ingeniería (2023), son cruciales para garantizar la calidad y minimizar riesgos de fallas estructurales. Estas prácticas han sido aplicadas exitosamente en casos emblemáticos, como la estabilización de la Torre de Pisa (Lizzi, 1982) y la cimentación del Puente Vasco de Gama (Moehle, 2014).

En este trabajo se incluyen además aspectos prácticos relevantes, como las aplicaciones sísmicas y el comportamiento bajo cargas laterales, documentados por Khan (2015) y Handy (2018). Estos autores destacan la importancia de considerar fenómenos como la licuefacción y los asentamientos diferenciales al evaluar la interacción entre el micropilote y el terreno. Asimismo, se revisan ejemplos de proyectos internacionales que ilustran cómo estas técnicas y principios se han adaptado a contextos geotécnicos específicos.

El objetivo de esta revisión bibliográfica es consolidar y analizar la información existente sobre los aspectos geotécnicos y constructivos de los micropilotes, proporcionando un recurso técnico útil para geotecnistas e ingenieros estructurales. Al abordar temas como la caracterización del terreno, las técnicas de instalación y las prácticas de supervisión, este documento busca ofrecer una perspectiva integral que facilite la toma de decisiones en proyectos de cimentaciones profundas, garantizando soluciones sostenibles y efectivas.

Marco Teórico

Los micropilotes representan una solución técnica altamente eficaz para abordar desafíos geotécnicos en proyectos de cimentaciones profundas. Su capacidad para transferir cargas de manera eficiente hacia estratos más competentes del terreno los convierte en una alternativa clave en terrenos con baja capacidad portante, suelos licuables o áreas susceptibles a la socavación. Además, su flexibilidad en términos de instalación y diseño permite su implementación tanto en proyectos nuevos como en la rehabilitación de estructuras existentes.

La versatilidad de los micropilotes radica en su capacidad para mitigar riesgos como asentamientos diferenciales, licuefacción y fallas estructurales derivadas de condiciones adversas del terreno. Según Lizzi (1982) y el FHWA (2000), los micropilotes son particularmente útiles en situaciones donde las cimentaciones tradicionales no son viables, ya sea por limitaciones de acceso, restricciones de vibraciones o complejidades geotécnicas. Esta cualidad los convierte en una herramienta indispensable para prolongar la vida útil de construcciones existentes que enfrentan problemas de estabilidad.

Adicionalmente, los avances en técnicas constructivas, como la inyección controlada y los sistemas autoperforantes, han mejorado significativamente su capacidad para adaptarse a condiciones complejas del suelo, minimizando el impacto en las estructuras circundantes durante la instalación (Indraratna et al., 2015). Estas características los posicionan no solo como una solución preventiva frente a fallas estructurales futuras, sino también como una alternativa de refuerzo para proyectos en operación que requieren una cimentación más robusta.

El presente marco teórico analiza los fundamentos técnicos que sustentan el uso de los micropilotes en la ingeniería estructural y geotécnica, abordando sus características, aplicaciones y los mecanismos que garantizan su desempeño. Asimismo, se revisan los aspectos más relevantes de su interacción con el suelo y los factores que influyen en su capacidad para resolver problemáticas geotécnicas y estructurales a largo plazo.

Definición General de Micropilotes:

Los micropilotes son elementos estructurales utilizados en cimentaciones profundas para transferir cargas a estratos resistentes en terrenos con condiciones geotécnicas complejas. Estos sistemas, introducidos en Europa durante la década de 1950, han sido ampliamente adoptados en proyectos de rehabilitación y construcción de infraestructuras críticas, como puentes, edificios y estabilización de taludes. Debido a su capacidad de adaptación, los micropilotes son ideales para condiciones donde los métodos tradicionales no son viables, como en terrenos de difícil acceso o en proyectos que requieren control estricto de vibraciones (FHWA, 2000; Handy, 2018). El diseño e instalación de micropilotes involucran la perforación de un agujero en el terreno, la inserción de un elemento estructural de acero y la inyección de lechada de cemento y/o concreto para asegurar

su adherencia al suelo. Este proceso garantiza una transferencia de carga eficiente y una estabilidad estructural adecuada, incluso en terrenos con alta actividad sísmica o suelos blandos (Day, 2009).

A diferencia de los pilotes tradicionales, Craig (2022) define que los micropilotes se caracterizan por su diámetro reducido (generalmente entre 100 mm y 300 mm) y su capacidad para instalarse en condiciones restrictivas (ver ilustración 1), como áreas urbanas congestionadas o terrenos complejos donde el acceso es limitado. Mientras que los pilotes tradicionales con diámetros superiores a 400 mm, basados en FHWA (2017) e Indraratna et al. (2015), confirman que están diseñados para soportar cargas elevadas en proyectos de gran escala, como puentes y rascacielos, los micropilotes ofrecen mayor versatilidad y son especialmente útiles en la rehabilitación de estructuras existentes. Además, los métodos constructivos de los micropilotes, como la inyección controlada y los sistemas autopercutores, generan menos vibraciones y desplazamientos en el terreno circundante, lo que los hace ideales para entornos sensibles.

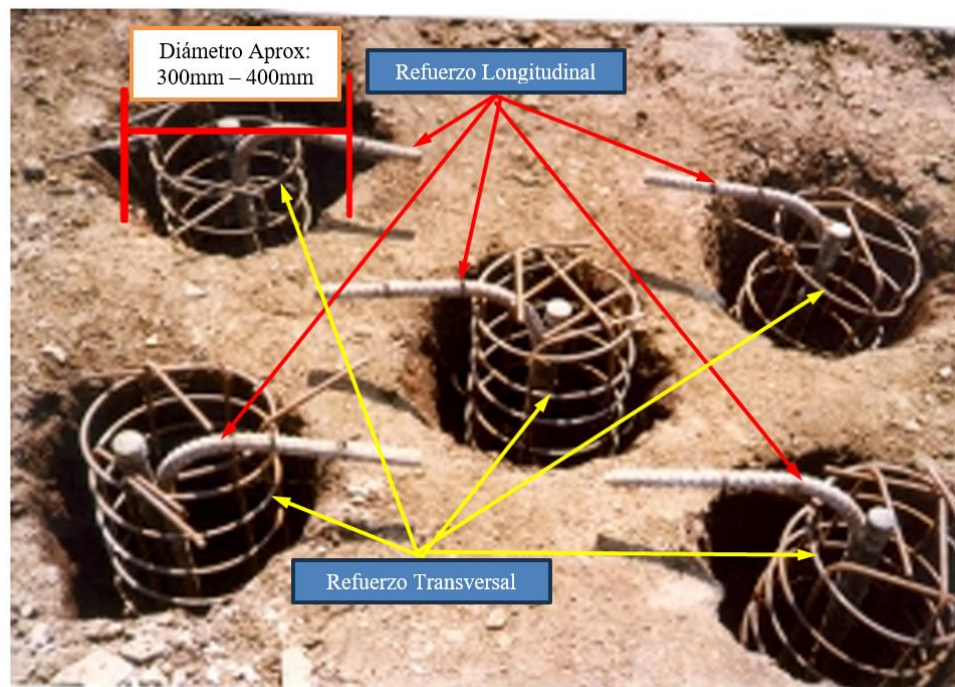


Ilustración 1. Esquema Detalle ilustrativo micropilotes.

Fuente: Vieco (2023).

Caracterización de suelos y Propiedades Geotécnicas.

La caracterización de suelos y el análisis de sus propiedades geotécnicas son aspectos fundamentales para garantizar el éxito de las cimentaciones profundas con micropilotes. Estas cimentaciones, diseñadas para transferir cargas hacia estratos resistentes del terreno, dependen directamente de un entendimiento detallado de las condiciones geotécnicas. Este marco teórico aborda los elementos esenciales para cumplir el primer objetivo específico de esta revisión, centrándose en la clasificación y caracterización de suelos, los mecanismos de transferencia de

carga en micropilotes, y su implementación como solución para suelos problemáticos, apoyándose en las directrices del *Eurocódigo 7*, el documento *Load Transfer Mechanisms in Micropiles under Lateral Loads*, y los estudios de Indraratna et al. (2015).

La clasificación y caracterización del suelo son pasos fundamentales en cualquier proyecto de cimentaciones profundas. El *Eurocódigo 7*, como normativa internacional, proporciona directrices específicas para evaluar los suelos y garantizar su adecuada interacción con los elementos de cimentación. Este código divide los suelos en tres categorías principales:

- **Suelos cohesivos:** Identificados por su plasticidad y cohesión interna, que influyen directamente en su capacidad portante y su respuesta a cargas verticales y laterales.
- **Suelos granulares:** Compuestos principalmente por arenas y gravas, presentan una mayor estabilidad, pero son más susceptibles a la compactación y pérdida de fricción lateral en presencia de agua.
- **Rocas fracturadas o degradadas:** Aunque suelen tener alta capacidad portante, requieren técnicas específicas para evitar inestabilidad o fallas por fracturación.

El *Eurocódigo 7* también establece que la caracterización del terreno debe incluir parámetros como:

- **Ángulo de fricción interna (ϕ):** Esencial para calcular la fricción lateral y determinar la resistencia al deslizamiento en suelos granulares.
- **Cohesión (c):** Un indicador clave en suelos cohesivos que afecta tanto la capacidad portante como la interacción entre el suelo y la lechada del micropilote.
- **Módulo de deformación (E):** Determina la capacidad del suelo para soportar cargas sin experimentar deformaciones excesivas.

Un ejemplo práctico de la aplicación del *Eurocódigo 7* es la estabilización de cimentaciones en terrenos fluviales, como en el Puente Vasco de Gama (Portugal) (ver ilustración 2), donde la caracterización precisa del suelo como suelo fluvial de baja capacidad portante y licuable, permitió adaptar las técnicas de cimentación por medio de micropilotes que encontraran la capacidad portante precisada en la construcción y el diseño y así mitigar riesgos de asentamientos diferenciales.



Ilustración 2. Esquema de puente Vasco de Gama (Portugal)
Fuente: Brigginfo (2012)

- **Mecanismos de transferencia de carga**

El desempeño estructural tanto de los micropilotes como de los pilotes tradicionales se basa fundamentalmente en la interacción entre el elemento estructural y el terreno circundante, lo que se logra a través de tres mecanismos principales: la resistencia por fricción lateral, la resistencia por punta y la combinación de ambos en sistemas híbridos (ver ilustración 3). Estos mecanismos son inherentes a la transferencia de cargas en elementos de cimentación profunda, independientemente de su tamaño o método constructivo. En ambos casos, el diseño busca capturar correctamente la interacción entre el suelo y el elemento, dicha interacción es conocida como el proceso mediante el cual las cargas de una estructura afectan el comportamiento del suelo subyacente y a su vez las deformaciones del suelo afectan la estructura (Day, 2009) reduciendo problemáticas futuras de asentamientos e inestabilidades, considerando las propiedades geotécnicas del terreno, como la cohesión, el ángulo de fricción y la capacidad de carga. La literatura técnica enfatiza que este principio es universal para cimentaciones profundas. Por ejemplo, Day (2009) y Handy (2018) destacan que la correcta captura mencionada de la interacción suelo-estructura, se convierte en el aspecto más crítico para garantizar la estabilidad y funcionalidad de sistemas de cimentación profunda, tanto en pilotes como en micropilotes. La principal diferencia radica, por tanto, no en los mecanismos de transferencia, sino en las aplicaciones específicas y los métodos constructivos, los cuales están condicionados por el entorno y las necesidades del proyecto.

A continuación, se explicará de una manera más puntual los mecanismos principales antes mencionados:

- **Capacidad portante en punta:** Las cargas se transfieren directamente al estrato más resistente ubicado en la base del micropilote. Este mecanismo es predominante en suelos cohesivos o rocosos (Day, 2009).

- **Fricción lateral:** Este mecanismo implica la resistencia generada a lo largo de la superficie lateral del micropilote debido al contacto con el suelo. Es efectivo en suelos densos o cohesivos (Handy, 2018).
- **Fricción negativa:** Fenómeno en el cual el suelo circundante ejerce cargas descendentes adicionales al micropilote, lo que puede reducir su capacidad efectiva. Este problema se mitiga con revestimientos o técnicas de diseño específicas (FHWA, 2000).

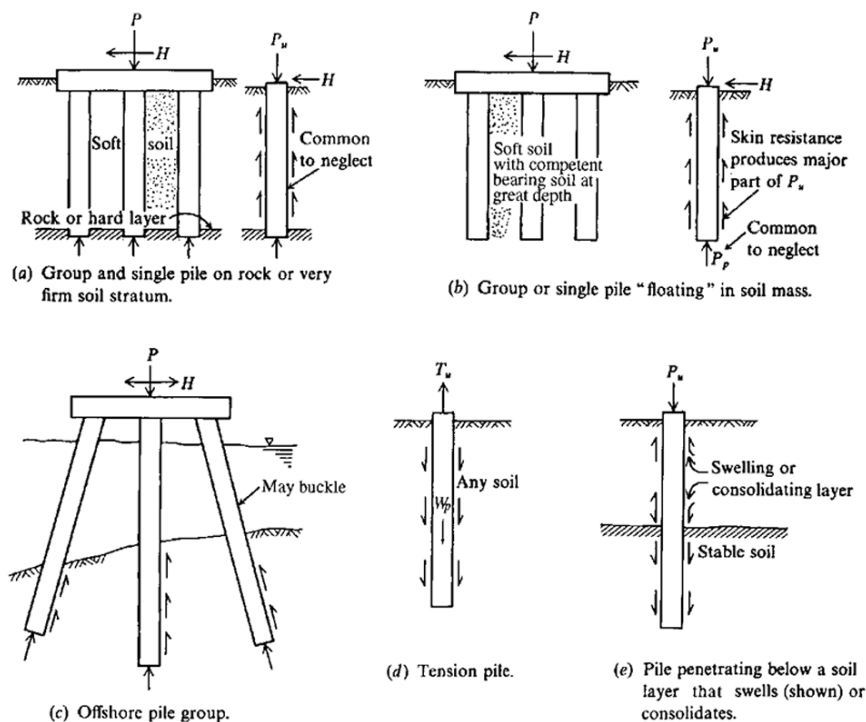


Ilustración 3. Configuración típica de transferencia de carga en Pilas y Micropilotes.

Fuente: Day (2009).

A pesar de compartir los principios básicos de transferencia de carga, los micropilotes y los pilotes tradicionales presentan diferencias significativas en su comportamiento estructural debido a sus características geométricas y constructivas. Una de las diferencias más notables es el diámetro. Los micropilotes, al ser de pequeño diámetro (generalmente menos de 300 mm según FHWA, 2000), presentan una mayor esbeltez en comparación con los pilotes tradicionales, lo que puede incrementar su susceptibilidad a pandeo en condiciones de carga axial elevada. Además, el proceso constructivo de los micropilotes, que a menudo implica la inyección de lechada a alta presión (Lizzi, 1982), favorece una mayor adherencia inicial con el terreno circundante, mientras que los pilotes suelen depender más de la compactación mecánica durante la hincada o de técnicas de perforación específicas. Por otra parte, los micropilotes son particularmente adecuados para terrenos difíciles o de acceso restringido, donde el uso de pilotes tradicionales sería inviable. En términos de capacidad de carga, la integración de los micropilotes con estructuras superficiales suele requerir una mayor densidad de elementos debido a su capacidad portante limitada por

unidad, en comparación con los pilotes. Estos aspectos diferenciales, bien documentados por Pearlman & Wolosick (1992) y en las guías de diseño de FHWA (2000), ilustran cómo cada tipo de cimentación profunda responde de manera única a las demandas estructurales y geotécnicas del proyecto.

A continuación, en la **tabla 1** se resumen los mecanismos y aplicaciones vs los riesgos y mitigación.

<i>Mecanismo</i>	<i>Aplicación</i>	<i>Riesgos y mitigación</i>	<i>Casos de aplicación</i>
Soporte en punta	Terrenos con estratos firmes	Asentamientos diferenciales	Puente Vasco de Gama (Portugal): Uso de micropilotes para estabilizar cimentaciones en terreno fluvial blando.
Fricción lateral	Suelos cohesivos y densos	Reducción de adherencia por agua	Torre de Pisa (Italia): Estabilización del terreno mediante micropilotes para detener el hundimiento.
Fricción negativa	Suelos blandos	Revestimientos o diseño modificado	Reconstrucción tras terremoto de Kobe (Japón): Uso de micropilotes para mitigar licuefacción y cargas dinámicas.

Tabla 1. Mecanismos de transferencia de carga en micropilotes y casos de aplicación

Fuente: Andy (2018).

El documento Load Transfer Mechanisms in Micropiles under Lateral Loads (Abbas, 2021) también profundiza en cómo modelar estos mecanismos a través de las curvas $p-y$ (ver ilustración 4), que representan la relación entre la presión lateral (P) y el desplazamiento (Y). Estas curvas permiten capturar el comportamiento no lineal del suelo, especialmente bajo cargas laterales inducidas por viento, sismos o impactos. Por ejemplo:

- En suelos cohesivos, las curvas $p-y$ muestran una resistencia inicial alta pero limitada a desplazamientos significativos.
- En suelos granulares, la resistencia aumenta gradualmente, reflejando una mayor capacidad de adaptación a cargas dinámicas.

Los factores geotécnicos que afectan la respuesta incluyen la densidad relativa, la compactación, y las condiciones de saturación del suelo. Estas características determinan la presión máxima que puede soportar el suelo antes de fallar, lo que es crucial para garantizar la estabilidad estructural del micropilote.

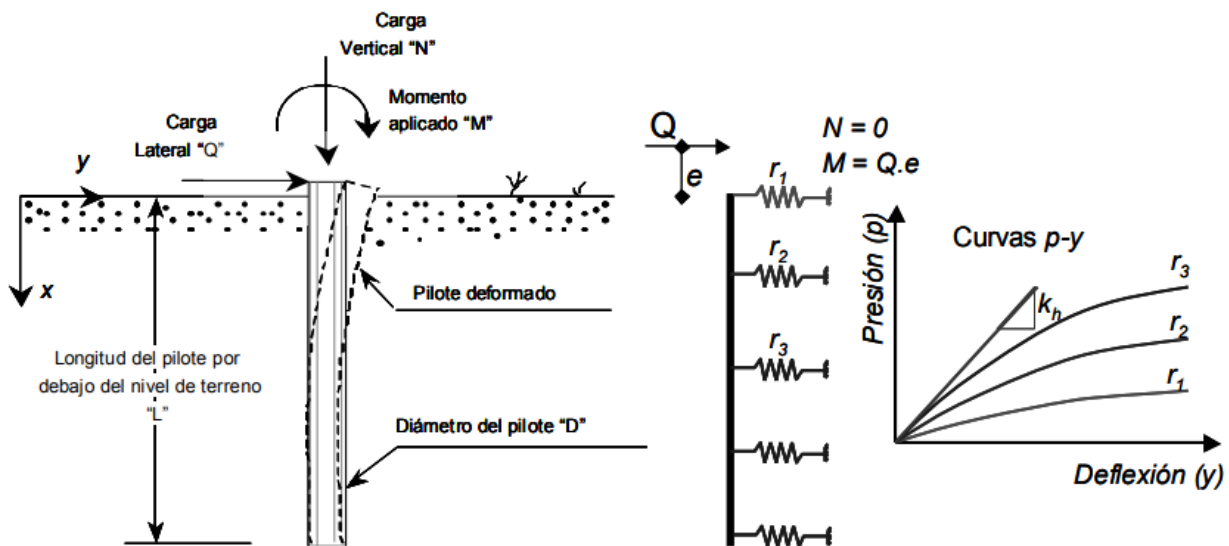


Ilustración 4. Curva P-Y de Pilote sometido a carga vertical y horizontal.

Fuente: ARRÚA, P. A., & AIASSA, G. M. (2009).

- **Micropilotes como solución para suelos críticos.**

En su estudio, *Indraratna et al. (2015)* destacan cómo los micropilotes se han convertido en una solución eficiente para terrenos con condiciones geotécnicas complejas. Entre sus principales aplicaciones se encuentran:

- **Suelos licuables:** Los micropilotes ayudan a reducir el riesgo de licuefacción al reforzar el terreno y disipar las presiones generadas por cargas dinámicas.
- **Suelos blandos:** En terrenos con baja capacidad portante, la combinación de inyecciones de lechada y refuerzos estructurales mejora significativamente la interacción suelo-estructura.
- **Suelos colapsables:** Mediante la inyección de lechadas de alta presión, los micropilotes estabilizan estructuras y evitan deformaciones excesivas.

- **Casos de estudio:**

- **Estabilización de taludes en el sudeste asiático:** Los micropilotes se utilizaron en combinación con técnicas de drenaje para prevenir deslizamientos en terrenos saturados. (*Indraratna et al., 2015*).
- **Rehabilitación de cimentaciones en Australia:** En este caso, los micropilotes reforzaron puentes afectados por asentamientos diferenciales, garantizando su funcionalidad a largo plazo, (*Indraratna et al., 2015*).

- **Infraestructuras urbanas en India:** La implementación de micropilotes permitió construir edificios en terrenos anteriormente considerados inadecuados debido a su baja capacidad portante, (Indraratna et al.,2015).

Comportamiento Sísmico e interacción suelo estructura

El comportamiento sísmico de los micropilotes es un área de gran relevancia en la ingeniería estructural y geotécnica, especialmente en regiones con alta actividad sísmica. Colombia se encuentra en zonas de alta sismicidad. Estos elementos estructurales desempeñan un papel crucial al mitigar riesgos asociados a licuefacción, asentamientos diferenciales y cargas dinámicas. A continuación, se examinarán la interacción de los micropilotes con el suelo en condiciones sísmicas, las metodologías innovadoras para garantizar la resiliencia estructural, y el uso de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial (IA) bajo su subdisciplina de aprendizaje automático (*machine learning*). El análisis se basa en las contribuciones del documento "*Advancements in Micropile Design and Applications in Seismic Zones*" (2021), que ofrece una perspectiva integral sobre el diseño y uso de micropilotes en zonas sísmicas.

- Zonas sísmicas y retos

Las zonas sísmicas representan entornos altamente desafiantes para el diseño de cimentaciones. Estas regiones se caracterizan por su actividad tectónica frecuente, que genera fuerzas dinámicas capaces de afectar gravemente la estabilidad de las estructuras. Entre los principales riesgos geotécnicos asociados a zonas sísmicas se encuentran:

- **Licuefacción del suelo:** Un fenómeno donde los suelos saturados pierden su rigidez y resistencia al ser sometidos a cargas sísmicas, generando fallas graves en las cimentaciones.
- **Asentamientos diferenciales:** Movimientos desiguales en el terreno que comprometen la estabilidad estructural y generan deformaciones no deseadas.
- **Cargas dinámicas:** Fuerzas laterales y verticales inducidas por movimientos sísmicos que afectan la interacción suelo-estructura.

En el contexto de estas condiciones extremas, los micropilotes ofrecen una solución efectiva gracias a su capacidad para distribuir las cargas dinámicas y reforzar los suelos propensos a licuefacción.

Distribuir las cargas dinámicas significa que los micropilotes están diseñados para transmitir las fuerzas generadas durante eventos como terremotos (cargas dinámicas) de manera eficiente y uniforme a los estratos más profundos y competentes del subsuelo. A diferencia de las cargas estáticas, que son constantes y generadas por el peso de la estructura y otras fuerzas

permanentes, las cargas dinámicas son fuerzas variables que actúan de manera rápida y cambiante debido a la aceleración del terreno durante un sismo. A continuación, se comparte unos breves conceptos sobre el por qué las cargas dinámicas son más importantes que las cargas estáticas:

- Durante un sismo, las cargas dinámicas pueden ser significativamente mayores que las cargas estáticas debido a la energía liberada por el movimiento del terreno. Estas fuerzas pueden generar vibraciones, torsiones y desplazamientos en la estructura (Moehle, 2014).
- Si las cargas dinámicas no son manejadas adecuadamente, pueden inducir fallas en los elementos estructurales, causar asentamientos diferenciales o incluso el colapso total (Day, 2009).
- En suelos susceptibles a la licuefacción, como arenas saturadas, las cargas dinámicas pueden reducir drásticamente la capacidad portante del terreno. Esto ocurre porque la presión de poros en el suelo aumenta rápidamente, disminuyendo la fricción interna entre partículas (FHWA, 2000).
- Los micropilotes refuerzan el suelo al transferir las cargas dinámicas hacia estratos más profundos y estables, evitando que la estructura dependa exclusivamente de las capas superficiales (Lizzi, 1982).

Los micropilotes presentan ventajas significativas sobre otras técnicas de cimentación, como pilotes, zapatas y pilas, cuando se enfrentan a terrenos susceptibles a licuefacción. A diferencia de las zapatas, cuyo desempeño depende de la resistencia superficial del terreno, los micropilotes pueden penetrar capas profundas de suelo estable, transfiriendo las cargas más allá de las zonas vulnerables a licuefacción. En comparación con los pilotes tradicionales, los micropilotes ofrecen mayor adaptabilidad en terrenos con variaciones estratigráficas pronunciadas, ya que su instalación mediante perforación e inyección permite alcanzar zonas de mayor resistencia sin provocar vibraciones adicionales que podrían exacerbar la licuefacción. Además, los micropilotes permiten un refuerzo activo del terreno circundante mediante la inyección de lechada a presión, lo que mejora la compactación y cohesión del suelo, reduciendo significativamente el potencial de licuefacción (Lizzi, 1982; FHWA, 2000). Este proceso de mejora del terreno no es intrínseco a otros métodos de cimentación como las pilas o zapatas, que dependen principalmente de la capacidad original del suelo.

Lo que hace a los micropilotes especialmente efectivos en terrenos susceptibles a licuefacción es su capacidad para modificar las propiedades mecánicas del suelo durante su instalación. La presión controlada de inyección de lechada crea un sistema de refuerzo interno que incrementa la densidad del suelo circundante y reduce la permeabilidad, factores clave para prevenir la pérdida de resistencia efectiva causada por la licuefacción (Pearlman & Wolosick, 1992). Este efecto estabilizador no solo refuerza la capacidad del suelo para soportar cargas

estáticas y dinámicas, sino que también actúa como una barrera frente a los desplazamientos laterales del terreno, mitigando el potencial de colapso. A diferencia de los pilotes tradicionales, cuyo diseño se enfoca en transferir cargas verticales, los micropilotes se comportan como un sistema híbrido que combina la transferencia de cargas con la mejora integral del terreno. Su pequeño diámetro y alta flexibilidad estructural permiten instalar múltiples elementos en configuraciones densas, lo que distribuye las cargas dinámicas de manera uniforme y reduce las tensiones localizadas en terrenos licuables. Esta combinación única de refuerzo activo y transferencia eficiente de cargas posiciona a los micropilotes como una solución óptima en proyectos donde el riesgo de licuefacción es crítico (FHWA, 2000; Handy, 2018).

- Micropilotes e Interacción con el Suelo en Zonas Sísmicas

Los micropilotes destacan como una opción eficiente en cimentaciones profundas en zonas sísmicas debido a su capacidad para:

- **Disipar energía sísmica:** Mediante su interacción con el suelo y su diseño flexible, los micropilotes absorben y redistribuyen las fuerzas generadas por los movimientos sísmicos.
- **Reforzar suelos licuables:** La inyección de lechada de cemento mejora las propiedades del suelo circundante, aumentando su resistencia y capacidad de carga.
- **Reducir asentamientos diferenciales:** Los asentamientos diferenciales están definidos como las diferencias en la magnitud de los asentamientos que ocurren entre distintos puntos de una estructura, lo que puede generar inclinaciones, fisuras o daños estructurales (ver ilustración 5, 6 y 7). Gracias a su capacidad para distribuir cargas de manera uniforme, los micropilotes minimizan los efectos de movimientos irregulares del suelo.

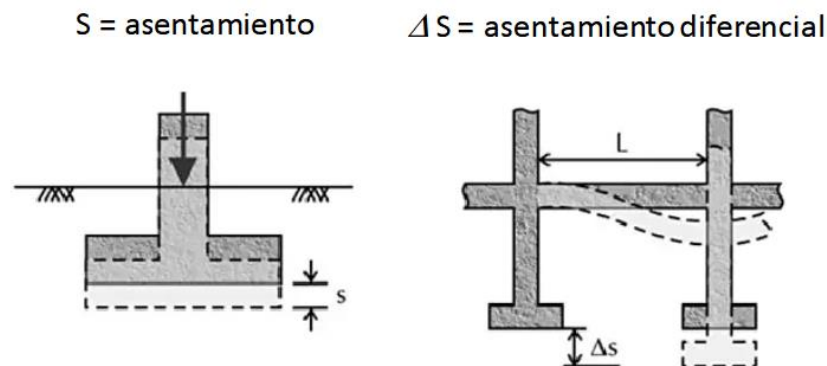


Ilustración 5. Asentamiento y asentamientos diferenciales.

Fuente: Bond Harris (2008).



Ilustración 6. Caso ejemplo de asentamiento diferencia en edificación.

Fuente: AN Ingenieros y Consultores (2008).

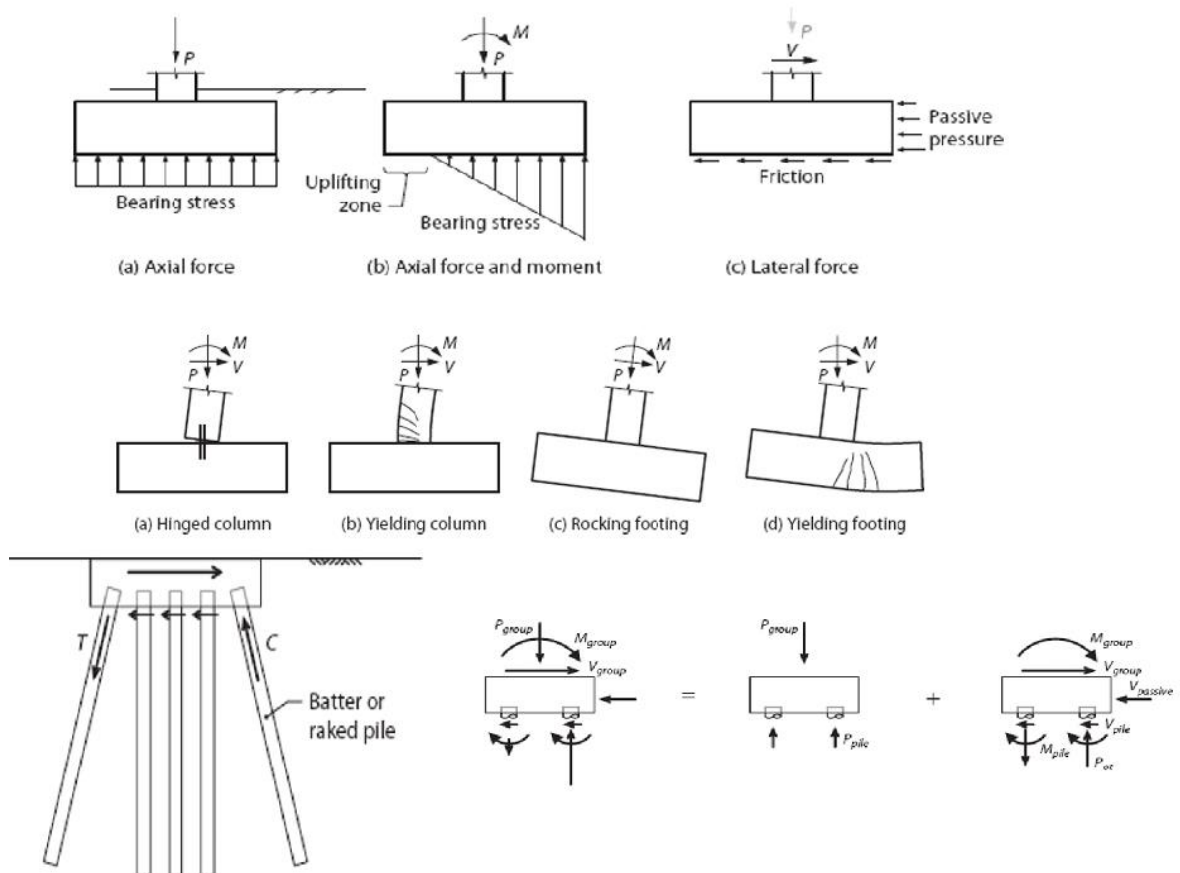


Ilustración 7. Comparación de sistemas sin micropilote y con micropilotes.

Fuente: Moehle (2009).

Craig (2022) señala que la interacción suelo-estructura de los micropilotes en zonas sísmicas se ve influenciada por factores como:

- **La rigidez del suelo:** Determina la capacidad del micropilote para disipar cargas dinámicas.
- **La longitud del micropilote:** A mayor longitud, mayor capacidad para transferir cargas a estratos profundos y más resistentes, este concepto crea un nuevo termino de aceptabilidad, y es con referencia a los límites de esbeltez.

La esbeltez aceptable de un micropilote depende de varios factores técnicos, como el tipo de terreno, las cargas a soportar y el diseño específico del proyecto. La relación de esbeltez (longitud total del micropilote entre su diámetro, (L/D)) suele ser una medida clave para evaluar su estabilidad frente a fenómenos como el pandeo, a continuación, se explicará 3 fundamentos básicos para evaluar el límite de pandeo en una construcción basados en: normativas, condiciones de terreno, y cargas dinámicas.

Según el manual de la FHWA (2000), una relación L/D de hasta 100 es comúnmente aceptada en condiciones normales de carga axial. Sin embargo, en terrenos menos estables o cuando existen cargas laterales significativas, se recomienda limitar la esbeltez a valores más bajos (por ejemplo, entre 60 y 80) para evitar problemas de estabilidad estructural.

En terrenos firmes o densos, pueden aceptarse relaciones de esbeltez más altas, ya que el apoyo lateral del terreno reduce la posibilidad de pandeo. Por otro lado, en suelos blandos o cohesivos con baja capacidad de confinamiento, es fundamental diseñar micropilotes con menor esbeltez o reforzar el sistema mediante grupos de micropilotes dispuestos de forma que trabajen en conjunto.

Cuando los micropilotes están sometidos a cargas dinámicas o sísmicas, las condiciones pueden amplificar los efectos del pandeo debido a la combinación de fuerzas axiales, momentos de flexión y esfuerzos cortantes provocados por los desplazamientos del terreno. Por ello, un menor índice de esbeltez es fundamental para aumentar su capacidad de resistir estas cargas sin desarrollar fallas por flexión o corte (Moehle, 2014). En estos casos, se recomienda un diseño con esbeltez inferior a 80, según lo señalado por Pearlman & Wolosick (1992).

El método de instalación: Técnicas como la inyección controlada mejoran la adherencia al suelo y optimizan la transferencia de carga.

Un ejemplo destacado de Craig (2022) señala que el uso de micropilotes en zonas urbanas de alta actividad sísmica, donde se combinaron con sistemas de drenaje para mitigar la licuefacción y reforzar cimentaciones críticas en puentes y edificios.

- **Métodos para Garantizar Resiliencia Estructural**

El documento *Advancements in Micropile Design and Applications in Seismic Zones (2021)* propone un enfoque integral para garantizar que las estructuras cimentadas con micropilotes puedan soportar eventos sísmicos significativos. Este enfoque incluye:

- **Modelado numérico avanzado:** Este término se refiere a la utilización de técnicas computacionales sofisticadas para simular el comportamiento de los micropilotes bajo

diversas condiciones, como cargas dinámicas inducidas por sismos. Un modelo avanzado incluye la representación precisa de los materiales, el suelo, y la interacción suelo-estructura, utilizando herramientas como elementos finitos (FEM) o elementos discretos (DEM). Estos modelos permiten integrar múltiples variables, como no linealidad de materiales, licuefacción, y efectos de acoplamiento dinámico, lo que los hace especialmente útiles para estudiar el comportamiento complejo que ocurre durante un sismo.

- **Métodos de diseño basado en desempeño:** En lugar de limitarse a cumplir con normativas, este enfoque busca garantizar que las cimentaciones sean funcionales incluso después de un evento sísmico mayor.
- **Uso de refuerzos adicionales:** Como anclajes y sistemas híbridos que aumentan la capacidad de disipación de energía y mejoran la estabilidad general del sistema.

Estos métodos han sido aplicados exitosamente en proyectos como la rehabilitación de puentes en regiones de alta actividad sísmica en Japón, donde los micropilotes se combinaron con estructuras auxiliares para garantizar la funcionalidad de las infraestructuras tras terremotos de gran magnitud.

- **Incorporación de IA a través del Machine Learning.**

Un aspecto innovador del documento es el uso de inteligencia artificial (IA) a través machine learning en el diseño y monitoreo de micropilotes en zonas sísmicas. Estas tecnologías permiten:

- **Optimizar el diseño:** Algoritmos de aprendizaje automático analizan grandes volúmenes de datos geotécnicos (perfiles estratigráficos, capacidad portante, niveles freáticos, presión de poros y variaciones temporales de agua subterránea, cohesión, ángulo de fricción, densidad y permeabilidad) y estructurales (cargas estáticas y dinámicas, magnitudes y distribuciones, dimensiones, esbeltez, propiedades mecánicas de los materiales) para generar diseños más eficientes y adaptativos.
- **Predecir el comportamiento sísmico:** Basándose en datos históricos (Magnitudes, frecuencias, duraciones y acelerogramas registrados en la región, Intervalos de tiempo entre eventos sísmicos y zonas de mayor actividad sísmica, espectros de respuesta, velocidades de propagación y efectos de amplificación local), y modelos de simulación, los sistemas de IA pueden anticipar cómo responderán los micropilotes a futuros eventos sísmicos.
- **Monitoreo de respuesta en tiempo real:** Sensores avanzados conectados a sistemas de IA permiten evaluar el estado de las cimentaciones durante y después de un evento sísmico, facilitando decisiones rápidas para la rehabilitación o refuerzo de estructuras. Entre las

principales respuestas monitoreadas se encuentran las deformaciones, como desplazamientos laterales y verticales, que ayudan a identificar asentamientos diferenciales; los esfuerzos internos, incluyendo fuerzas axiales, momentos de flexión y esfuerzos cortantes, que revelan sobreesfuerzos críticos; las vibraciones, como frecuencias y amplitudes, esenciales para evaluar la resonancia del sistema suelo-estructura; la presión de poros, que indica posibles fenómenos de licuefacción; la interacción suelo-estructura, clave para verificar la rigidez relativa entre los micropilotes y el terreno; y las condiciones del suelo, como cambios en densidad y cohesión, fundamentales para garantizar la capacidad portante tras el evento. Este monitoreo integral permite decisiones rápidas y fundamentadas para rehabilitar o reforzar las estructuras, minimizando riesgos y costos mientras se asegura la funcionalidad y estabilidad futuras.

Por ejemplo, un modelo que cumpla con los requerimientos de monitoreo podría predecir el comportamiento exacto de una estructura que use los micropilotes en ambientes no comunes y con ambientes adversos diferente a los estudiados en modelos matemáticos actuales, en la ilustración 8, se muestra un escenario complejo de predecir si se toman en cuenta todos los diferentes aspectos geotécnicos y estructurales existentes en la realidad como: cambio de características del suelo por muro de contención en parte izquierda inferior, cambio de estratos, cambios de geometría estructural y de cargas, presiones de poros, entre otros.

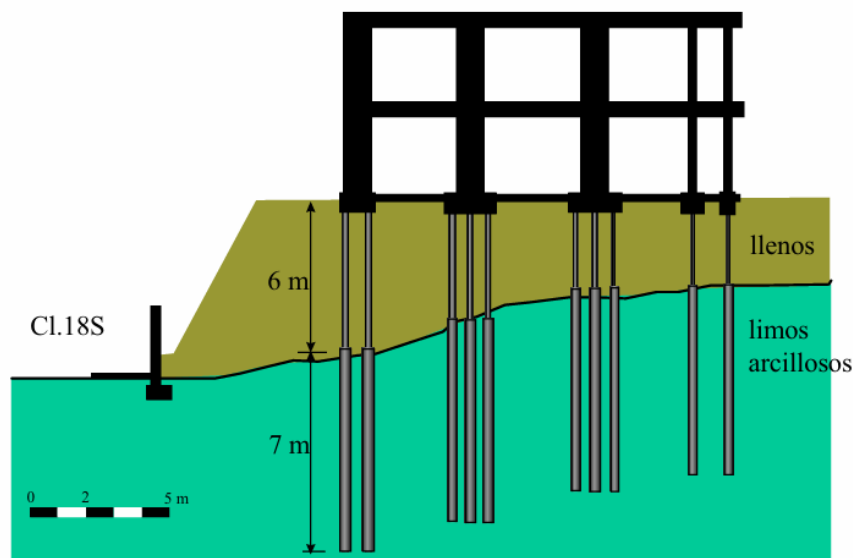


Ilustración 8. Esquema de modelo de uso de micropilotes en escenarios complejos.

Fuente: Vieco (2023).

El documento *Advancements in Micropile Design and Applications in Seismic Zones* destaca (N.M. Galagali, et al, 2021) el caso de un proyecto piloto en California, donde la IA se utilizó para diseñar micropilotes en una región con alta actividad sísmica, logrando una reducción significativa en los costos de diseño y una mejora en el desempeño estructural frente a cargas dinámicas.

Técnicas de Construcción y Métodos de supervisión

Las técnicas constructivas y los métodos de supervisión en la instalación de micropilotes son factores determinantes para garantizar su desempeño en proyectos reales. Estos elementos no solo aseguran la correcta transferencia de cargas al terreno, sino que también reducen los riesgos de fallas estructurales y optimizan el tiempo y los costos asociados al proceso de construcción. A continuación, se abordarán los métodos de instalación, control de calidad, nuevos materiales y tecnologías innovadoras en el contexto de los micropilotes, explorando contribuciones clave de los documentos de *FHWA (2017)*, *Eurocódigo 7, Load Transfer Mechanisms in Micropiles under Lateral Loads (2020)*, *Advancements in Micropile Design and Applications in Seismic Zones (2021)*, *Indraratna et al. (2015)* y *Craig, R.F (2022)*.

- Clasificación y Aplicación

Los micropilotes pueden clasificarse en función de su método de construcción y su aplicación específica:

Por método de construcción.

El documento de la FHWA (2000, 2017), en sus dos publicaciones y ambos volúmenes, mencionan los tipos de micropilotes según los tipos de construcción y materiales.

- **Tipo A:** Lechada inyectada por gravedad.
- **Tipo B:** Lechada inyectada a alta presión para mejorar la capacidad portante.
- **Tipo C:** Inyección repetitiva con múltiples fases para optimizar la interacción suelo-estructura.
- **Tipo D:** Micropilotes autoperforantes. En este método, la barra de refuerzo funciona también como herramienta de perforación, permitiendo la inyección de lechada simultáneamente durante el proceso de perforación. Es altamente eficaz en suelos colapsables o inestables, donde las técnicas tradicionales serían complicadas (FHWA, 2000).

En la ilustración 9, se muestran los tipos de micropilotes por método de construcción.

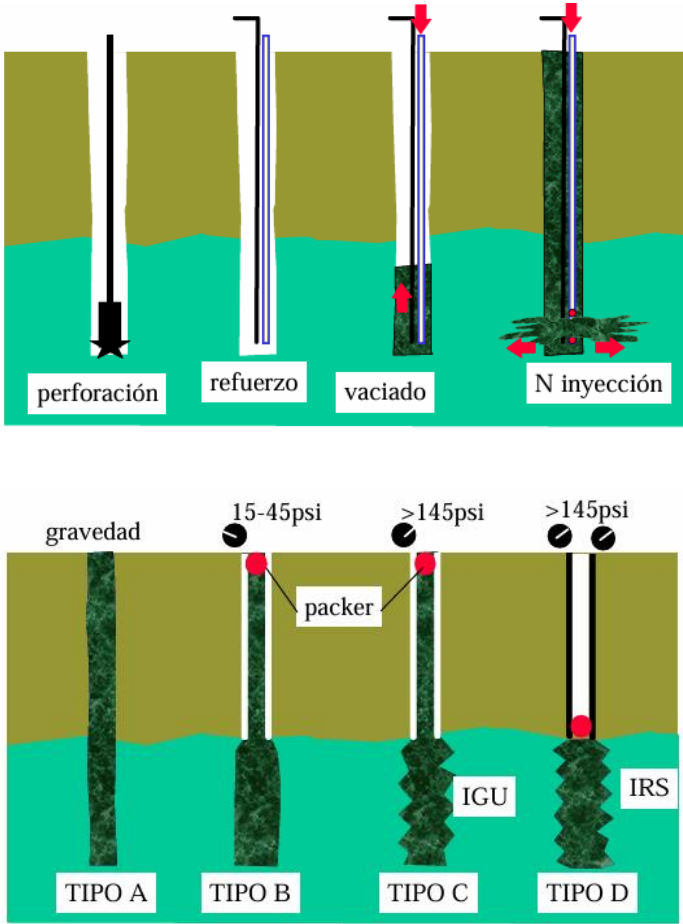


Ilustración 9. Clasificación de Micropilotes según sistema de construcción.

Fuente: Vieco (2023).

La **Tabla 2** presenta una clasificación detallada de los micropilotes basada en el método de inyección (o construcción). Esta clasificación incluye subcategorías numeradas (1, 2 y 3), que describen el uso de la tubería de perforación y el tipo de refuerzo necesario para cada método. Estas subclasificaciones reflejan las necesidades estructurales específicas de diseño, como el uso de barras de refuerzo, tuberías de revestimiento, o la ausencia de refuerzo. La tabla enfatiza un enfoque sistemático para categorizar los micropilotes según el tipo de construcción, proporcionando una guía clara para seleccionar el método más adecuado según las condiciones del proyecto (FHWA, 2000).

Tipo de Micropilote y Método de Inyección	Subtipo	Entubado de Perforación	Refuerzo	Lechada
Tipo A - Solo lechada por gravedad	A1	Temporal o sin entubado (agujero abierto o taladro)	Ninguno, barra única, jaula o sección estructural	Mortero de arena/cemento o lechada simple de cemento, colocada en la base del agujero (o revestimiento), sin aplicación de presión
	A2	Permanente, longitud total	El entubado de perforación en si mismo	
	A3	Permanente, solo en el tramo superior	El entubado de perforación en el tramo superior, barra(s) o tubo en el tramo inferior (puede extenderse a toda la longitud)	
Tipo B - Lechada presurizada: inyectada a través del revestimiento o taladro durante la extracción	B1	Temporal o sin entubado (agujero abierto o taladro)	Barra(s) o tubo (las jaulas son raras debido a menor capacidad estructural)	La lechada simple de cemento se introduce primero en el entubado de perforación o taladro. El exceso de presión (hasta 1 MPa típicamente) se aplica durante la extracción del entubado/taladro
	B2	Permanente, longitud parcial	El entubado de perforación en si mismo	
	B3	Permanente, solo en el tramo superior	El entubado de perforación en el tramo superior, barra(s) o tubo en el tramo inferior (puede extenderse a toda la longitud)	
Tipo C - La lechada primaria se coloca bajo gravedad, seguida de una fase secundaria de inyección "global" bajo presión	C1	Temporal o sin entubado (agujero abierto o taladro)	Barra(s) o tubo (las jaulas son raras debido a menor capacidad estructural)	La lechada simple de cemento se introduce primero en el entubado de perforación o taladro. Entre 15 y 25 minutos después, se inyecta una lechada similar a través del tubo (o refuerzo) desde la cabeza, una vez que la presión supera 1 MPa
	C2	No se realiza	–	
	C3	No se realiza	–	
Tipo D - La lechada primaria se coloca bajo gravedad (Tipo A) o presión (Tipo B). Luego, una o más fases de inyección "global" secundaria bajo presión	D1	Temporal o sin entubado (agujero abierto o taladro)	Barra(s) o tubo (las jaulas son raras debido a menor capacidad estructural)	La lechada simple de cemento se introduce primero (Tipo A) y/o se presuriza (Tipo B). Más tarde, se inyecta una lechada similar a través de un tubo de revestimiento o refuerzo mediante válvulas, tantas veces como sea necesario para lograr una buena adherencia
	D2	Solo posible si el tubo de revestimiento completo se coloca fuera del entubado	El entubado de perforación en si mismo	
	D3	Permanente, solo en el tramo superior	El entubado de perforación en el tramo superior, barra(s) o tubo en el tramo inferior (puede extenderse a toda la longitud)	

Tabla 2. Detalles de la Clasificación de Micropilotes Basada en el Tipo de Inyección de Lechada

Fuente: (FHWA, 2000).

El control de calidad en estas técnicas incluye pruebas de carga estática y dinámica, monitoreo del comportamiento del suelo y verificaciones visuales durante la instalación. Además, el documento de la FHWA (2000, 2017) resalta el uso de nuevos materiales como mezclas de cemento de alta resistencia y aditivos químicos que mejoran las propiedades de la lechada y garantizan su durabilidad. Finalmente, promueve el diseño de cimentaciones resilientes, capaces de adaptarse a cambios geotécnicos y estructurales a lo largo del tiempo.

Por aplicación.

- **Refuerzo de cimentaciones existentes:** utilizados para mejorar la capacidad de carga de estructuras antiguas. Ver ilustración 10.

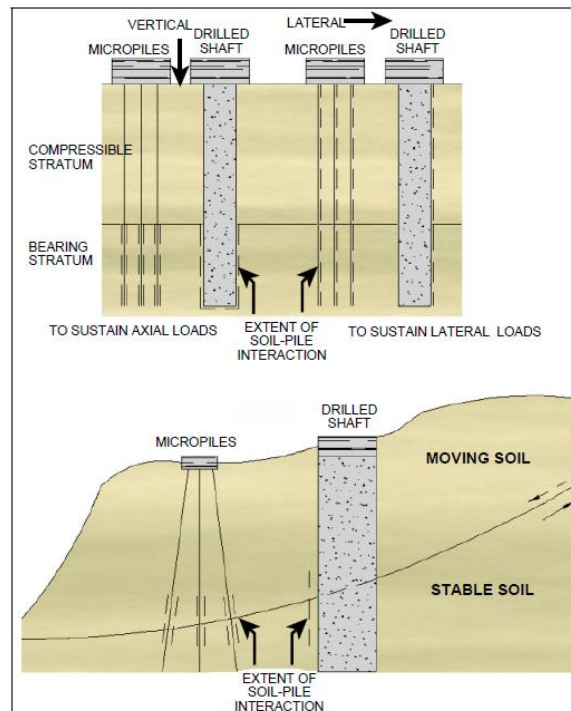


Ilustración 10. Micropilotes como refuerzo a cimentaciones existentes.

Fuente: (FHWA, 2000).

- **Construcción en zonas urbanas:** Adecuados para espacios confinados con mínimas perturbaciones al entorno. Ver ilustración 11.

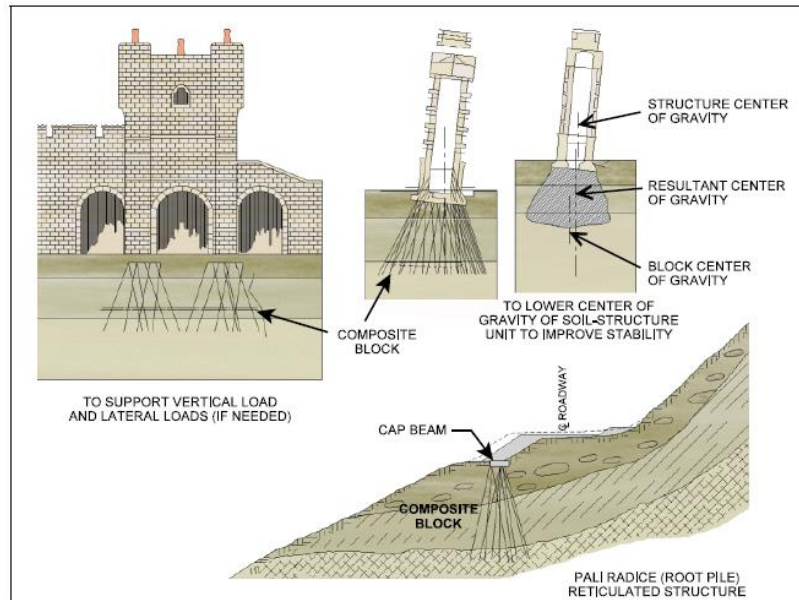


Ilustración 11. Micropilotes como refuerzo a cimentaciones existentes en zonas urbanas.

Fuente: (FHWA, 2000).

- **Retrofit sísmico (repotenciación):** Refuerzo de estructuras para soportar cargas dinámicas en regiones con alta actividad sísmica (Moehle, 2014). Ver ilustración 12.

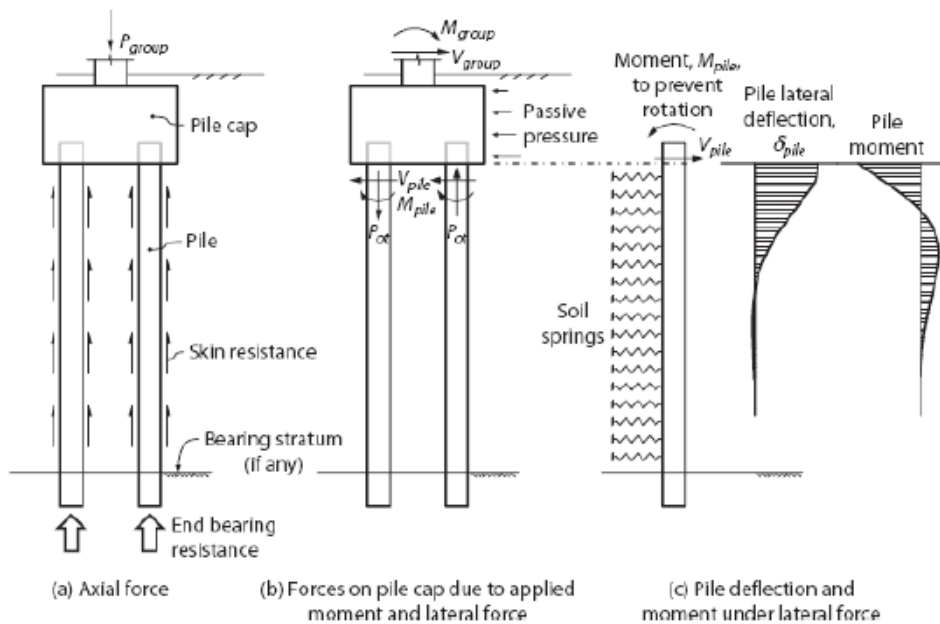


Ilustración 12. Mecanismos de Resistencia para cimentaciones con Micropilotes.

Fuente: (Moehle, 2014).

- **Recomendaciones y Estados Límite según el Eurocódigo 7**

El Eurocódigo 7 establece criterios específicos para garantizar la calidad en la instalación de micropilotes, basándose en el cumplimiento de estados límite de servicio y estados límite últimos. Entre sus principales recomendaciones se incluyen:

- **Verificación de asentamientos diferenciales:** Para evitar deformaciones excesivas que comprometan la funcionalidad estructural.
- **Garantía de capacidad portante:** Asegurando que los micropilotes puedan soportar tanto cargas axiales como laterales, incluso en condiciones extremas.
- **Monitoreo continuo:** Incluye el uso de sensores para medir desplazamientos y presiones durante y después de la instalación. Después de la instalación, se miden desplazamientos verticales para identificar asentamientos diferenciales y desplazamientos laterales asociados con cargas dinámicas o empujes del terreno. Además, se monitorea la presión de poros para evaluar cambios en el agua intersticial que puedan comprometer la estabilidad del suelo, asegurando que la cimentación mantenga su capacidad portante en el tiempo. Este monitoreo es esencial para detectar anomalías y garantizar la seguridad estructural a largo plazo.

El Eurocódigo también enfatiza la importancia de documentar todo el proceso constructivo, incluyendo características del suelo, métodos de instalación y pruebas de carga, para asegurar que los resultados cumplan con los requisitos de diseño.

- **Métodos de Instalación y Contribuciones Técnicas** El documento *Load Transfer Mechanisms in Micropiles under Lateral Loads (2020)* analiza los resultados esperados de diferentes técnicas de instalación de micropilotes, centrándose en su desempeño bajo cargas laterales. Entre las contribuciones clave se encuentran:

- **Efectos del método de instalación:** Técnicas como la inyección a alta presión mejoran significativamente la fricción lateral y la capacidad de disipar cargas dinámicas.
- **Resultados esperados:** Se destacan curvas p - y más estables en suelos cohesivos y densos cuando se aplican métodos de inyección controlada.
- **Contribución al diseño estructural:** Las técnicas modernas permiten optimizar la interacción suelo-estructura, reduciendo los asentamientos y mejorando la capacidad portante.

- **Técnicas Modernas de Construcción.**

El documento *Advancements in Micropile Design and Applications in Seismic Zones (2021)* introduce tecnologías avanzadas como la inyección secuencial controlada y los micropilotes reforzados, diseñados para aumentar la resistencia a cargas dinámicas en zonas sísmicas. Estas técnicas incluyen:

- **Tecnología de inyección:** Uso de lechadas autocompactantes para mejorar la cohesión entre el micropilote y el suelo.
- **Micropilotes reforzados con fibra:** Incrementan la capacidad de carga y reducen la susceptibilidad a fallas por fatiga.
- **Diseño basado en simulaciones numéricas:** Permite prever el comportamiento de los micropilotes bajo escenarios de cargas extremas.

Estas innovaciones han sido implementadas con éxito en regiones de alta actividad sísmica, como Japón y Chile, donde se enfrentaron desafíos significativos asociados a licuefacción y asentamientos diferenciales.

- **Métodos de Supervisión constructiva e Innovación Tecnológica**

Indraratna et al. (2015) destacan la importancia de los métodos de supervisión durante la instalación de micropilotes. Estos incluyen:

- **Uso de sensores avanzados:** Para medir presiones internas, desplazamientos y fuerzas aplicadas en tiempo real.
- **Innovaciones tecnológicas:** Herramientas como el monitoreo remoto y el análisis de datos en tiempo real optimizan la supervisión y garantizan la calidad del proceso constructivo.
- **Técnicas de retroalimentación:** Permiten ajustar los parámetros de instalación en función de los datos obtenidos, asegurando que los resultados sean consistentes con los objetivos del proyecto.

Un caso emblemático citado es el uso de sensores en la rehabilitación de cimentaciones en Australia, donde se logró reducir el tiempo de instalación y mejorar el desempeño final de los micropilotes.

- **Métodos Modernos y Caso de Estudio**

El documento *Craig, R.F (2022)*, explora métodos modernos como la inyección de lechada con válvulas múltiples, que permite una distribución uniforme en suelos heterogéneos. Además, presenta un caso de estudio en Italia, donde los micropilotes fueron utilizados para estabilizar una cimentación en un terreno fluvial altamente erosionable. Este proyecto destacó por la combinación de tecnologías avanzadas y métodos tradicionales, logrando resultados sobresalientes en términos de capacidad portante y reducción de asentamientos.

Normativa y directrices.

El IBC International Building Code (Código Internacional de Construcción) establece lineamientos específicos (Ver tabla 3) para cimentaciones profundas, como:

- **Capacidad mínima de carga:** Basada en pruebas estáticas y dinámicas.
- **Profundidad mínima requerida:** Ajustada según las propiedades del terreno.
- **Procedimientos de inspección:** Para garantizar la calidad en la construcción (Day, 2009).

<i>Parámetro</i>	<i>Requisito según IBC</i>
Profundidad mínima	30 cm
Capacidad portante	Determinada por pruebas
Inspecciones requeridas	Durante la instalación

Tabla 3. Parámetros normativos según IBC.

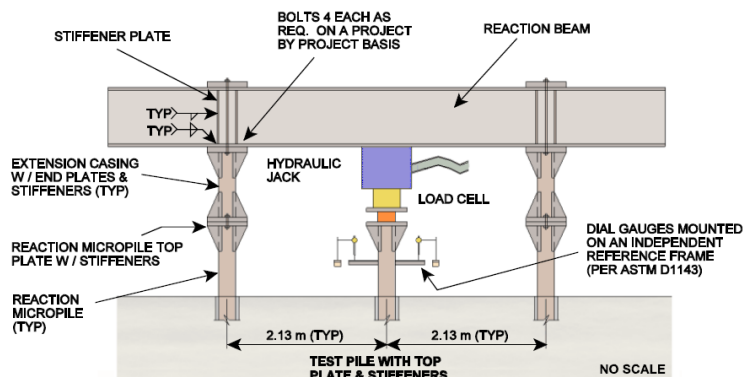
Fuente: Day (2009).

Métodos de instalación y control de calidad

El proceso de instalación de los micropilotes incluye perforación, colocación del refuerzo y lechada, y pruebas de carga. Los métodos más utilizados son:

- **Perforación rotatoria:** Permite alcanzar capas profundas con alta precisión.
- **Inyección controlada:** Garantiza una adecuada adherencia al terreno y optimiza la capacidad portante (FHWA, 2000).

Las pruebas de carga son fundamentales para verificar el desempeño de los micropilotes en condiciones reales. Estas pruebas incluyen análisis estáticos y dinámicos que aseguran que el diseño cumple con los requisitos de seguridad y eficiencia (Day, 2009). Ver ilustraciones 13, 14.



TYPICAL COMPRESSION LOAD TEST ARRANGEMENT (ASTM D1143)

Ilustración 13. Configuración típica para prueba de carga.

Fuente:(FHWA, 2000).

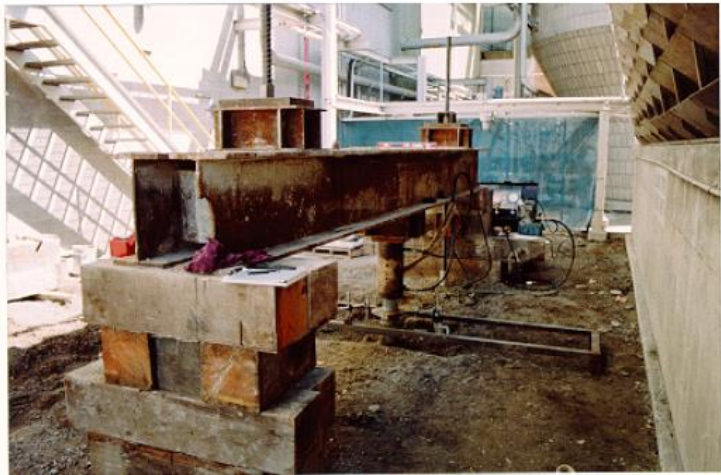
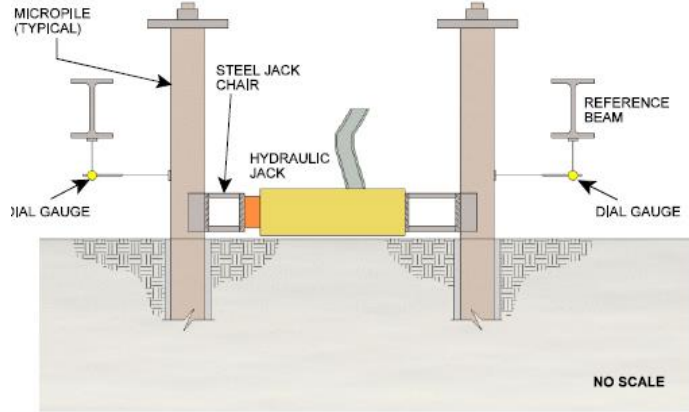


Ilustración 14. Disposición para la Prueba de Carga Lateral (ASTM D1143).

Fuente:(FHWA, 2000).

Metodología

El desarrollo de esta revisión bibliográfica se enfocó en recopilar, analizar y sintetizar información relevante sobre micropilotes, un sistema de cimentación profunda ampliamente utilizado en proyectos de ingeniería civil. La metodología se estructuró en fases, que incluyeron la selección de fuentes, criterios de análisis, y la delimitación del alcance de la revisión. Se priorizó un enfoque técnico y normativo, con especial atención a estudios aplicados y normativas relacionadas con el diseño, instalación y evaluación de micropilotes en diferentes contextos geotécnicos.

Fuentes y criterios de selección:

Fuentes consultadas.

Las fuentes utilizadas en esta revisión provienen de libros especializados, artículos técnicos, bases de datos bibliográficas de la Universidad de Antioquia (Accessss-Smart Search, Access-Engineering, ASTM) tomada como una base bibliográfica confiable y ampliamente utilizada por catedráticos en la universidad por su veracidad y gran recopilación de material académico, y publicaciones de organismos internacionales, así como estudios de empresas colombianas reconocidas en el campo de los micropilotes. Entre los principales documentos analizados, se incluyen:

1. Libros técnicos.

- Foundation Engineering - Handbook de Day (2009), una referencia fundamental en diseño y construcción de cimentaciones.
- Deep Foundations - Handy (2018), que abarca conceptos técnicos y prácticos de cimentaciones profundas.
- Load Transfer Mechanisms in Micropiles under Lateral Loads (2020): Este documento detalla los mecanismos de transferencia de carga en micropilotes, especialmente bajo cargas laterales, y analiza los resultados esperados según las técnicas de instalación utilizadas.
- Indraratna et al. (2015): Este libro explora los micropilotes como solución para suelos problemáticos, destacando su capacidad de estabilización y las técnicas de supervisión necesarias para garantizar su desempeño.

2. Palabras claves para búsqueda en base de datos. (Orden de prioridad y efectividad en base

de datos)

- **Términos técnicos mas comunes:** Micropiles, Mini-piles, deeps Foundation systems, soil reinforcement, Lightweight structures foundations, Ground improvement techniques, grouted piles. Mas funcional por ser mas precisa.
- **Operadores Booleanos:** micropiles AND lightweight structures, micropiles OR mini-piles, micropiles NOT offshore. Bastante funcional por filtrar sinónimos o antónimos.
- **Búsqueda avanzada:** Micropiles AND soil reinforcement AND lightweight structures, Ground improvement techniques AND grouted piles AND seismic zones. Menos funcional por ser muy específico.

3. *Publicaciones técnicas.*

- **Micropile Design and Construction Guidelines (FHWA, 2000)**, un manual práctico para el diseño y construcción de micropilotes.
- **Estudios locales de Vieco Ingeniería (2023)**, que documentan aplicaciones prácticas y casos de estudio en Colombia.
- **Advancements in Micropile Design and Applications in Seismic Zones (2021)**: Una referencia fundamental que analiza las técnicas modernas de construcción en zonas de alta actividad sísmica, incluyendo el uso de tecnología de inyección, micropilotes reforzados y enfoques basados en simulaciones y aprendizaje automático.
- **Craig, R.F (2022)**: Este documento detalla métodos modernos de construcción, como la inyección con válvulas múltiples, y presenta un caso de estudio en Italia que ilustra la implementación práctica de estas técnicas avanzadas.

4. *Normativas y directrices técnicas*

- **FHWA (2017)**: Este documento proporciona lineamientos actualizados sobre el diseño, construcción y supervisión de micropilotes, incluyendo métodos de instalación, control de calidad, nuevos materiales y diseños resilientes.
- **Eurocódigo 7**: Una referencia clave para los estados límite de servicio y las recomendaciones para garantizar la seguridad y funcionalidad de las cimentaciones profundas en diferentes condiciones geotécnicas.

Criterios de selección.

1. *Los documentos seleccionados cumplieron con los siguientes criterios:*

- **Relevancia técnica:** Fuentes que abordan específicamente los micropilotes, su diseño, aplicaciones y normativas.
- **Actualidad:** Se priorizaron publicaciones recientes o relevantes en términos de normativas y avances tecnológicos.
- **Aplicación práctica:** Documentos que describen implementaciones en proyectos reales, como los casos de estudio de Vieco Ingeniería.
- **Diversidad geográfica:** Fuentes internacionales y locales para incluir perspectivas globales y regionales.

2. Razón para la elección de cada artículo:

- **Foundation Engineering Handbook (Day, 2009):** Seleccionado por ser una referencia clave en normativas y diseño de cimentaciones profundas.
- **Micropile Design and Construction Guidelines (FHWA, 2000):** Elegido por su enfoque práctico y exhaustivo sobre métodos de instalación y diseño.
- **Publicaciones de Vieco Ingeniería:** Incluidas por documentar aplicaciones locales, particularmente en Colombia, y su contribución al contexto regional de micropilotes.

Parámetros principales de análisis.

Los parámetros utilizados para analizar y sintetizar la información fueron:

- **Clasificación técnica:** Tipos de micropilotes según su método de inyección y aplicaciones específicas.
- **Transferencia de carga:** Mecanismos fundamentales de fricción lateral y capacidad portante en punta.
- **Normativas internacionales:** Criterios de diseño establecidos por el International Building Code (IBC) y otros estándares.
- **Aplicaciones prácticas:** Implementaciones documentadas en proyectos reales, evaluando los resultados y su impacto técnico.

Alcance de la revisión bibliográfica.

El alcance de esta revisión bibliográfica se centró en:

- **Características Geotécnicas de los suelos:** Características geotécnicas de suelos

- **Comportamiento Sísmico:** Revisión de estudios y avances actuales con respecto a uso de micropilotes
- **Técnica constructiva:** Ejemplos reales que ilustran la versatilidad y efectividad de los micropilotes en proyectos de infraestructura.

La revisión está guiada por un análisis técnico detallado de las fuentes seleccionadas, orientado a identificar las mejores prácticas y tendencias actuales en el uso de micropilotes.

Limitaciones.

Esta revisión enfrenta varias limitaciones inherentes a la amplitud del tema:

- **Variedad de implementaciones:** La diversidad de casos de estudio y aplicaciones dificulta abarcar todas las posibles configuraciones y escenarios en los que se utilizan micropilotes.
- **Normativas variadas:** Aunque el IBC proporciona una base sólida, existen múltiples regulaciones específicas de cada región, lo que complica un análisis exhaustivo de todas las normativas existentes.
- **Falta de uniformidad en las fuentes:** Algunas publicaciones carecen de información detallada o no son totalmente comparables debido a las diferencias en metodologías o enfoques técnicos.

Estado del arte

Los micropilotes, introducidos por Lizzi (1982) como una solución innovadora para cimentaciones profundas, han evolucionado significativamente desde su creación en los años 50. Inicialmente diseñados para rehabilitar estructuras históricas, los micropilotes demostraron ser una herramienta eficaz para resolver problemas de capacidad portante y asentamientos diferenciales.

La combinación de sus propiedades geométricas y sus ventajas de instalación lo ubicó como una de las mejores soluciones constructivas a nivel global. En las décadas de 1980 y 1990, la implementación de normativas específicas como el FHWA Micropile Design Manual (2000) y el desarrollo de sistemas de inyección avanzados aumentaron su eficiencia y confiabilidad en proyectos de infraestructura crítica (Day, 2009).

Actualmente, los micropilotes se emplean en aplicaciones que van desde la cimentación de rascacielos hasta la estabilización de taludes y la rehabilitación de estructuras afectadas por sismos. En Colombia, empresas como Vieco Ingeniería, consultores geotecnistas, han adaptado estas tecnologías a las particularidades geotécnicas locales, mostrando su efectividad en proyectos de alto impacto (Vieco Ingeniería, 2023).

Este estado del arte examina su evolución histórica, casos de aplicación en Colombia y el mundo, y los avances tecnológicos que han optimizado su diseño y uso. En la tabla 4, se crea la relación entre los avances del uso y su impacto en la construcción moderna del sistema de cimentación.

Año	Hito	Descripción	Impacto en Desafíos Actuales
1952	<i>Invencción por Fernando Lizzi</i>	Introducción de los "pali radice" en Italia, utilizados para rehabilitar monumentos históricos.	Sentó las bases para el uso de micropilotes en la rehabilitación de estructuras existentes, abordando los desafíos de preservación histórica.
1970s	<i>Expansión internacional</i>	Los micropilotes comienzan a usarse en proyectos de infraestructura, incluyendo estabilización de taludes en Europa y Estados Unidos.	Popularizó el uso de micropilotes para proyectos complejos, resolviendo problemas relacionados con suelos de baja capacidad portante y taludes inestables.
1980s	<i>Avances en inyección y lechadas mejoradas</i>	Desarrollo de técnicas de inyección a alta presión y lechadas modificadas para aumentar la adherencia y la capacidad portante.	Mejóro la adaptabilidad de los micropilotes a suelos licuables y blandos, reduciendo riesgos de asentamientos y aumentando la seguridad estructural.

Año	Hito	Descripción	Impacto en Desafíos Actuales
2000s	Formalización normativa	Publicación del <i>FHWA Micropile Design and Construction Manual</i> , estableciendo estándares para diseño, pruebas y construcción.	Ofreció una guía técnica clara, garantizando calidad y consistencia en la instalación de micropilotes, adaptándose a normativas internacionales.
2020s	Automatización y monitoreo en tiempo real	Uso de sensores inteligentes y software avanzado para monitorear el comportamiento durante la instalación y la operación.	Responde a la necesidad de supervisión continua en proyectos complejos, permitiendo ajustes en tiempo real y aumentando la eficiencia y la precisión.

Tabla 4. Cronología del desarrollo e impacto del uso de micropilotes.

Implementaciones Históricas y Globales.

Los micropilotes se han utilizado en proyectos emblemáticos alrededor del mundo, demostrando su versatilidad y eficacia:

- **Rehabilitación de la Torre de Pisa (Italia, 1990s):** Utilización de micropilotes para estabilizar la estructura inclinada. Los ingenieros diseñaron un sistema de cimentación profunda utilizando inyecciones controladas para frenar el hundimiento y corregir parcialmente la inclinación (Lizzi, 1982).
- **Puente Vasco de Gama (Portugal, 1998):** Los micropilotes se emplearon para reforzar las cimentaciones de este puente de 17 km, soportando cargas dinámicas y estabilizando los pilares en un terreno fluvial blando.
- **Reconstrucción tras el terremoto de Kobe (Japón, 1995):** Se utilizaron micropilotes para estabilizar edificios dañados, destacándose por su capacidad para reducir asentamientos diferenciales y absorber cargas dinámicas (Moehle, 2014).

Desde su invención, los micropilotes han evolucionado significativamente, pasando de ser una solución limitada a convertirse en un pilar de la ingeniería civil moderna. A continuación, se evalúan los principales avances y enfoques tecnológicos:

Aspecto	Década de 1950-1980	Década de 2000-2020	Evaluación crítica
Técnicas de perforación	Métodos manuales y rudimentarios.	Perforación rotativa y rotopercutiva con control digital.	La precisión y velocidad actuales han reducido significativamente costos y riesgos de instalación.
Materiales y lechadas	Cementos simples para inyección por gravedad.	Lechadas modificadas con aditivos que mejoran adherencia.	Las mezclas avanzadas han incrementado la resistencia y la durabilidad, especialmente en ambientes hostiles.

Aspecto	Década de 1950-1980	Década de 2000-2020	Evaluación crítica
Normativas	Ausencia de regulaciones específicas.	Implementación de estándares internacionales como el IBC.	La regulación garantiza uniformidad y seguridad, pero las diferencias locales complican la estandarización.
Pruebas de carga	Métodos empíricos y no sistemáticos.	Pruebas estáticas, dinámicas y modelado computacional.	Las pruebas actuales permiten predicciones más confiables, pero representan altos costos iniciales.
Uso sísmico	Limitado, sin adaptaciones específicas.	Diseño sísmico integrado y configuración de grupos.	Las soluciones actuales han demostrado gran eficacia, pero requieren análisis detallados y software avanzado.

Tabla 5. Cronología del desarrollo y evaluación crítica del uso de micropilotes.

Análisis crítico de los avances normativos

Los avances normativos han jugado un papel crucial en la consolidación de los micropilotes como solución confiable. La publicación del *FHWA Micropile Design Manual* (2000) y su actualización en 2017 marcó un punto de inflexión al estandarizar los métodos de diseño y construcción. Sin embargo, persisten desafíos importantes:

- **Fragmentación normativa:** Aunque el International Building Code (IBC) ofrece un marco sólido, la falta de armonización entre normativas locales e internacionales dificulta la implementación global de mejores prácticas.
- **Pruebas obligatorias:** La inclusión de pruebas estáticas y dinámicas en normativas como el IBC ha mejorado significativamente la confiabilidad estructural, pero incrementa los costos iniciales, lo que puede limitar su adopción en proyectos pequeños.
- **Ausencia de guías específicas para regiones sísmicas:** Aunque se han documentado casos exitosos de micropilotes en zonas sísmicas, no existen normativas unificadas que incluyan estos diseños como estándar.
- **Norma Sismo Resistente Colombiana (NSR-2010):** Aunque en el enfoque de esta revisión no detallará el tema de diseño específico, es importante señalar como la norma colombiana (incluido el código colombiano de puentes) se presenta ante el tema de micropilotes y su uso en cimentaciones profundas. Lo más importante de resaltar es que ambos poseen limitaciones al no definir una guía específica para la construcción de micropilotes, y deja el diseño a extrapolaciones de las normas internacionales como el Eurocódigo y la guía de la FHWA. Es importante señalar que la norma colombiana, a pesar de definir zonas sísmicas, no dispone de los avances actuales sobre licuefacción y el uso de micropilotes para frenar este fenómeno tan peligroso presente en eventos sísmicos, aportando así a una desactualización de los avances tecnológicos que posee este tipo de cimentación profunda.

- **Norma Colombiana de diseño de puentes (CCP-2014):** En la sección 10.9 del Código Colombiano de Puentes, se establecen lineamientos claros para el diseño, instalación y evaluación de micropilotes como elementos de cimentación profunda. Para el estado límite de servicio, se enfatiza el control de asentamientos, desplazamientos laterales y movimientos tolerables que garanticen la funcionalidad de la estructura bajo cargas normales, asegurando que estas deformaciones no excedan límites permisibles. En el estado límite de resistencia, el diseño debe garantizar que los micropilotes puedan resistir cargas axiales y laterales sin fallar, considerando factores como la capacidad portante del terreno, la interacción suelo-micropilote, y las condiciones específicas del sitio. En el estado límite de evento extremo, se establece la importancia de evaluar el comportamiento de los micropilotes ante fenómenos como licuefacción, socavación y terremotos, asegurando su estabilidad estructural y funcionalidad en situaciones de alta demanda sísmica o condiciones geotécnicas extremas. En cuanto a corrosión y deterioro, el código subraya la necesidad de medidas protectoras, como recubrimientos adecuados y el uso de materiales resistentes, para evitar daños a largo plazo en ambientes agresivos o expuestos a agentes químicos. También se recomienda considerar los efectos acumulativos de degradación para garantizar la durabilidad de los micropilotes durante la vida útil del puente. Por último, el código exige la realización de pruebas de carga estáticas y dinámicas como un paso esencial para validar tanto la capacidad de diseño como el comportamiento en condiciones reales, asegurando que los micropilotes cumplan con los estándares requeridos para su implementación en proyectos de infraestructura crítica.

Comparación de enfoques: Casos en Colombia y el mundo.

Casos en Colombia

En Colombia, los proyectos recientes como el Centro Comercial Vizcaya y las viviendas en Manizales destacan la capacidad de los micropilotes para enfrentar desafíos específicos como:

- **Terrenos coluviales y pendientes:** Implementaciones en Vizcaya demostraron cómo las técnicas de perforación autoperforante pueden garantizar estabilidad en terrenos inestables.
- **Zonas sísmicas:** Los micropilotes usados en Manizales evidencian su efectividad para mitigar los efectos de deslizamientos y cargas dinámicas.

Análisis:

Aunque los casos colombianos muestran un excelente nivel técnico, su alcance podría ser limitado debido a la falta de documentación técnica exhaustiva y de pruebas de seguimiento a largo plazo.

Casos globales.

En comparación, proyectos como la rehabilitación de la Torre de Pisa y el Puente Vasco de Gama resaltan cómo las innovaciones tecnológicas han ampliado significativamente las aplicaciones de los micropilotes:

- **Torre de Pisa:** Uso de micropilotes con inyección controlada para frenar el hundimiento.
- **Puente Vasco de Gama:** Implementación de micropilotes en terrenos fluviales, destacando el manejo eficiente de cargas dinámicas y estabilización lateral.

Análisis:

Estos casos globales ejemplifican la capacidad de los micropilotes para adaptarse a entornos extremos. Sin embargo, su éxito se debe a la integración de tecnologías avanzadas y monitoreo continuo, algo que aún está en desarrollo en contextos como el colombiano.

Impacto y desafíos en la ingeniería moderna.

Positivo:

- **Flexibilidad de diseño:** Su capacidad para adaptarse a diversas condiciones de terreno ha ampliado el rango de proyectos posibles, desde rehabilitaciones hasta nuevas construcciones.
- **Sostenibilidad:** La reducción de vibraciones y la adaptabilidad a suelos con limitaciones ecológicas los hacen una opción más sostenible.
- **Resiliencia sísmica:** En regiones con alta actividad sísmica, los micropilotes ofrecen una solución confiable para reducir el riesgo de colapsos estructurales.

Desafíos actuales:

- **Costo inicial elevado:** Aunque son efectivos, su implementación requiere inversión en pruebas y maquinaria especializada.
- **Limitaciones tecnológicas en regiones menos desarrolladas:** Las tecnologías avanzadas aún no están completamente disponibles en todos los contextos geográficos.
- **Monitoreo post-instalación:** Aunque el monitoreo en tiempo real durante la instalación ha avanzado, el seguimiento estructural a largo plazo sigue siendo un área de mejora.
- **Monitoreo de pandeo y esbeltez:** El análisis por pandeo en micropilotes es un aspecto crucial del diseño de cimentaciones profundas, especialmente en escenarios donde las cargas axiales son predominantes o cuando los micropilotes presentan esbeltez significativa. A continuación,

se presentan dos métodos (posiblemente de muchos) usados actualmente para la verificación de esta variable, que son diferentes a los mencionados en el marco teórico dados por la FHWA.

Pandeo de micropilotes en terrenos inestables: El ministerio de Fomento (MFOM, 2005) aborda la evaluación del pandeo en micropilotes situados en suelos considerados inestables, según la "Guía para el proyecto y ejecución de pilotes en obras de carretera" y basados en el libro de Geotecnia y cimientos (Jiménez et al, 1980). La guía define como inestables a suelos cohesivos blandos con resistencia al corte no drenada (s_u) menor o igual a 25 kPa, suelos no cohesivos con índice de densidad (ID) menor o igual a 0.35, y suelos con valores de NSPT inferiores a 10. En estos casos, se utiliza un coeficiente de pandeo (R) basado en el factor CR, definido como la relación entre la longitud libre del micropilote (H) y el diámetro de la armadura o camisa perdida (DR). Si CR supera 40 ($H/DR > 40$), el coeficiente R se anula, indicando una resistencia nula al pandeo. Sin embargo, este criterio puede resultar conservador, ya que no considera la capacidad del terreno para confinar el micropilote. Como alternativa, el apéndice 3 de la guía propone una inequación adimensional que, al cumplirse, descarta cualquier efecto del pandeo. Esta fórmula incluye parámetros como el momento de inercia de la sección de acero (I_a), la sección de la armadura tubular (A_{pr}), la resistencia de cálculo del acero (f_{yd}), el módulo de elasticidad del acero (E_a) y el factor KD, que depende de la resistencia unitaria a la penetración estática (q_c) del suelo. La determinación precisa de KD es esencial y puede obtenerse mediante ensayos de penetración estática o correlaciones con el ensayo SPT, considerando el tamaño medio de las partículas del suelo (D_{50}). Este método permite una evaluación más realista del pandeo en micropilotes, especialmente en terrenos blandos o inestables.

Pandeo utilizando Módulos de elasticidad y momentos de Inercia: El documento "Pandeo de micropilotes que sustentan estructuras" el cual se basa en el artículo Bending and buckling of partially embedded piles (Davisson y Robinson, 1965) y Geotecnia y cimientos (Jiménez et al, 1980) aborda la evaluación del pandeo en micropilotes utilizados para recalzar estructuras, especialmente durante fases constructivas donde los micropilotes quedan expuestos antes de completar los arriostramientos. El método simplificado propuesto por Davisson y Robinson (1965) asume que el micropilote se comporta como una pieza prismática empotrada a una profundidad efectiva (L_f), calculada en función del coeficiente de reacción lateral del suelo: K para arcillas y nh para arenas. La longitud L_f se determina mediante las fórmulas:

- Para arcillas: $L_f = 2,5 \times (E_p \times I_p / K)^{(1/5)}$.
- Para arenas: $L_f = 2,5 \times (E_p \times I_p / nh)^{(1/5)}$

Donde E_p es el módulo de elasticidad del acero e I_p es el momento de inercia de la sección del micropilote. Una vez obtenida L_f , la carga crítica de pandeo (P_{cr}) se calcula utilizando

expresiones estándar de estabilidad estructural, ajustadas según las condiciones de apoyo en la cabeza del micropilote. Este método permite estimar la carga máxima que un micropilote puede soportar sin riesgo de pandeo, considerando tanto las propiedades del material como las características del suelo circundante.

Aplicación de micropilotes empujados hidráulicamente a recalces de cimentaciones: El análisis del pandeo de los micropilotes presentado en el artículo evalúa su estabilidad estructural frente a cargas axiales críticas en función de sus propiedades geométricas, mecánicas y del comportamiento del suelo circundante. El método se basa en la teoría estructural de Euler, ajustada a las condiciones de soporte lateral ofrecidas por el terreno, y utiliza el concepto de longitud libre efectiva (L_f), que depende del coeficiente de reacción lateral del suelo y las características del micropilote. Este análisis combina modelos numéricos y pruebas experimentales para validar los resultados teóricos y garantizar la resistencia frente al pandeo bajo cargas de diseño (Jiménez Salas et al., 1980).

Un aspecto clave del método es el uso del factor empírico R de pandeo, el cual se calcula para determinar la vulnerabilidad del micropilote al pandeo en función de la relación entre la longitud libre (H) y el diámetro de la armadura o camisa perdida (DR). Este factor se define como:

$$R=H/DR$$

Si el valor de RRR excede un límite crítico, generalmente fijado en 40, se considera que el micropilote está en riesgo de pandeo y se recomienda revisar el diseño, ya que el soporte lateral proporcionado por el terreno es insuficiente (Souche, 1984). El factor R incorpora parámetros empíricos basados en observaciones de campo y resultados de ensayos, lo que lo hace particularmente útil para evaluar micropilotes en suelos blandos o con bajo confinamiento. El método también incluye recomendaciones para mitigar el pandeo, como incrementar el diámetro del micropilote, reducir la longitud libre o mejorar el terreno circundante mediante técnicas de compactación o inyección.

Este enfoque proporciona un marco integral que combina análisis estructurales y geotécnicos para optimizar el diseño de los micropilotes, asegurando su estabilidad frente al pandeo en condiciones de carga y terreno específicas. Además, la integración de pruebas de carga estática y dinámica refuerza la validez del diseño, asegurando el cumplimiento de los requisitos estructurales y de servicio.

Conclusiones

Los micropilotes han demostrado ser una solución altamente eficaz en terrenos complejos, como suelos licuables, blandos y colapsables. Su capacidad para transferir cargas a través de fricción lateral y soporte en punta, combinada con el uso de tecnologías avanzadas como la inyección a alta presión, optimiza la interacción suelo-estructura. Sin embargo, persisten brechas en la investigación de su desempeño en suelos parcialmente saturados y en condiciones extremas, lo que subraya la necesidad de más estudios experimentales en estos escenarios.

En zonas de alta actividad sísmica, los micropilotes destacan por su capacidad para mitigar fenómenos como la licuefacción y los asentamientos diferenciales, al tiempo que disipan eficientemente las cargas dinámicas. Tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático han permitido predecir y optimizar su comportamiento, marcando un avance significativo en el diseño estructural.

Las técnicas modernas de construcción, como la inyección secuencial controlada y los micropilotes reforzados con fibra, han mejorado significativamente la eficiencia, capacidad portante y durabilidad de estas cimentaciones. Además, el uso de sensores avanzados y monitoreo en tiempo real ha transformado los métodos de supervisión, permitiendo ajustes durante la instalación y optimizando la calidad final. A pesar de estos avances, la implementación de estas tecnologías sigue siendo limitada en regiones con menor acceso a recursos tecnológicos.

La formalización de normativas como las directrices del FHWA (2017) y el Eurocódigo 7 ha mejorado la calidad y consistencia en la instalación de micropilotes, asegurando su cumplimiento en términos de estados límite de servicio y capacidad portante. Sin embargo, la falta de armonización entre normativas locales e internacionales limita su implementación global, especialmente en países con regulaciones específicas que no integran plenamente estas directrices.

El desarrollo de materiales avanzados, herramientas de simulación numérica (que no fueron abordados con detalle en esta revisión) y la integración de tecnologías de monitoreo continuo posicionan a los micropilotes como una solución clave en la ingeniería moderna. Las tendencias actuales hacia la sostenibilidad y la automatización refuerzan su relevancia, especialmente en

contextos de alta complejidad geotécnica y estructural. Su versatilidad los convierte en una herramienta indispensable para cimentaciones en áreas urbanas, proyectos de rehabilitación y zonas con alta actividad sísmica.

La integración de datos geotécnicos y estructurales a través de algoritmos de aprendizaje automático ha facilitado la generación de diseños más adaptativos y eficientes, contribuyendo a una mejor toma de decisiones en la ingeniería de cimentaciones profundas.

La implementación de tecnologías avanzadas, como el monitoreo en tiempo real y la inyección secuencial controlada, ha mejorado significativamente la calidad de instalación de los micropilotes, asegurando su desempeño a largo plazo bajo condiciones de carga estática y dinámica.

La caracterización detallada de suelos, incluyendo parámetros como resistencia al esfuerzo cortante y propiedades dinámicas, ha demostrado ser fundamental para prevenir licuefacción y asentamientos diferenciales, garantizando el éxito de los proyectos de micropilotes en suelos problemáticos.

La necesidad de actualizar y complementar la Norma Sismorresistente Colombiana (NSR-2010) es evidente, particularmente en el diseño y análisis de micropilotes, para incluir directrices específicas que aborden fenómenos como la licuefacción, la interacción suelo-estructura y el comportamiento dinámico en zonas sísmicas. Integrar metodologías modernas, como modelado numérico avanzado y tecnologías de monitoreo en tiempo real, permitiría fortalecer la capacidad normativa para enfrentar los desafíos geotécnicos y estructurales del contexto colombiano.

El Código Colombiano de Puentes (CCP-2014) establece lineamientos claros para el uso de micropilotes como elementos de cimentación profunda, abordando aspectos críticos como los requisitos de diseño en estados límite de servicio, resistencia y eventos extremos. Además, incorpora directrices específicas para controlar fenómenos como la corrosión y el deterioro, garantizando su durabilidad en ambientes agresivos. También exige pruebas de carga estáticas y dinámicas para validar su capacidad portante y comportamiento en condiciones reales, consolidando su aplicación como una solución eficiente y segura en proyectos de infraestructura vial en Colombia.

Referencias

- Day, R. W. (2009). *Foundation Engineering Handbook: Design and Construction with the 2009 International Building Code* (2ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2000). *Micropile Design and Construction Guidelines Implementation Manual (FHWA-SA-97-070)*. U.S. Department of Transportation.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2017). *Ground Modification Methods Reference Manual – Volumen I – II*. Department of Transportation.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2023). *Geotechnical and Hydraulic Issues at Scour-Critical Rivers and Bridges*. U.S. Department of Transportation.
- Handy, R. L. (2018). *Deep Foundations*. En *Geotechnical Engineering: Soil and Foundation Principles and Practice* (5ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., & Vinod, J. S. (2015). *Principles and Practice of Ground Improvement*. McGraw-Hill Education.
- Khan, M. A. (2015). *Flood Scour for Bridges and Highways: Prevention and Control of Soil Erosion*. McGraw-Hill Education.
- Craig, R. F. (2022). *Geotechnical Engineering: Principles and Practices* (4ª ed.). CRC Press.
- Lizzi, F. (1982). *The "Palo Radice" (Root Pile) Technique: Past and Present*. *International Journal of Restoration*.
- Moehle, J. (2014). *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*. McGraw-Hill Education.
- Pearlman, S. L., & Wolosick, J. R. (1992). *Micropile Design and Construction*. En *Advances in Foundation Engineering* (pp. 87-104). ASCE Publications.
- Vieco Ingeniería. (2023a). *Micropilotes en cimentaciones y contenciones*. Medellín, Colombia: Vieco Ingeniería.
- Vieco Ingeniería. (2023b). *Ejemplos de micropilotes*. Medellín, Colombia: Vieco Ingeniería.
- Vieco Ingeniería. (2023c). *BV Micropilotes: Implementaciones locales*. Medellín, Colombia: Vieco Ingeniería.
- Eurocódigo 7. (2004). *Geotechnical Design - Part 1: General Rules (EN 1997-1)*. Comité Europeo de Normalización. Disponible en: <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/showpdf.php?id=62>
- Abbas, Q., Kim, G., Kim, I., Kyung, D., & Lee, J. (2021). *Advancements in Micropile Design and Applications in Seismic Zones*. (2021). Abbas, Q., Kim, G., Kim, I., Kyung, D., & Lee, J. (2021).
- Arrúa, p. a., & aiassa, g. m. (2009). *curvas de transferencia de carga horizontal p-y para suelos limosos loésicos*. revista eia, (11), 131-143.
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2014). *Código Colombiano de Puentes: Diseño, construcción y mantenimiento*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Transporte.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.

- Ministerio de Fomento (MFOM). (2005). *Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes en obras de carretera*. España: Ministerio de Fomento.
- Jiménez Salas, J., Menéndez Carreira, A., & Serrano González, E. (1980). *Geotecnia y cimientos III*. Madrid, España: Ediciones Rueda.
- Davisson, M. T., & Robinson, K. E. (1965). *Bending and buckling of partially embedded piles*. Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2, 243-246.
- Jiménez Salas, J., Menéndez Carreira, A., & Serrano González, E. (1980). *Geotecnia y cimientos* (Vol. 3). Madrid, España: Ediciones Rueda.
- Souche, P. (1984). Étude du flambement de pieux partiellement immergés dans un milieu offrant latéralement une réaction élastique pure. *Annales de l'ITBTP*, Série "Soils et Foundations".