



Micropilotes: resumen teórico y dos casos en Bogotá

Micropiles: theoretical summary and two cases in Bogotá

LUIS FERNANDO OROZCO ROJAS¹ - MARCELA SALCEDO QUIJANO² -
JUAN SEBASTIÁN RUIZ HERNÁNDEZ³

1. Master of Science Ingeniería Civil. Lfo Ingenieros de Suelos S.A.S.

2. Magíster en Ingeniería Civil. Lfo Ingenieros de Suelos S.A.S.

3. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

lfoingenierosdesuelos@gmail.com - marcela.salcedo@escuelaing.edu.co - juan.ruiz-h@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 20/02/2025 Aceptado: 31/03/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se presenta un resumen teórico sobre el comportamiento y diseño de micropilotes, complementado con el análisis de dos casos de aplicación en la ciudad de Bogotá. Se describen los principios fundamentales del sistema, los mecanismos de transferencia de carga y los criterios generales de cálculo asociados a este tipo de cimentación profunda, al tiempo que se destaca su versatilidad en obras de refuerzo, submuración y control de asentamientos. A partir de la experiencia en los casos de estudio, se analizan aspectos relacionados con el desempeño estructural y geotécnico de los micropilotes en condiciones reales de obra, así como consideraciones constructivas relevantes para su implementación en entornos urbanos.

Los resultados y observaciones presentados evidencian el adecuado comportamiento de esta solución en suelos con restricciones geométricas y constructivas, y resaltan su utilidad como opción técnica eficiente en proyectos de rehabilitación y mejoramiento del terreno.

El trabajo aporta una visión aplicada basada en la experiencia profesional, orientada a la toma de decisiones en el diseño y la ejecución de micropilotes.

Palabras claves: micropilotes, pilotes raíz, submuración, control de asentamientos, cimentaciones especiales.

Abstract

This article presents a theoretical summary of the behavior and design of micropiles, complemented by the analysis of two application cases in the city of Bogotá. It describes the fundamental principles of the system, the load transfer mechanisms, and the general calculation criteria associated with this type of deep foundation, highlighting its versatility in reinforcement, underpinning, and settlement control works. Based on the experience in case studies, aspects related to the structural and geotechnical performance of micropiles in real construction conditions are analyzed, as well as construction considerations relevant to their implementation in urban environments.

The results and observations presented demonstrate the adequate performance of this solution in soils with geometric and construction restrictions, highlighting its usefulness as an efficient technical alternative in land rehabilitation and improvement projects.

The work provides an applied vision based on professional experience, aimed at decision-making in the design and execution of micropiles.

Keywords: micropiles, root piles, underpinning, settlement control, special foundations.

INTRODUCCIÓN

Los micropilotes o pilotes raíz (*palo radice*) tienen aplicaciones muy importantes para submurar o estabilizar suelos que podrían presentar problemas. Se trata de elementos de poco diámetro que llevan las cargas a suelos más competentes, a mayor profundidad, y que se pueden construir con máquinas de perforación con acceso a sitios difíciles. Por este motivo, algunas de sus aplicaciones incluyen la submuración de edificios que están sufriendo asentamientos totales o diferenciales excesivos; pero también se utilizan para estabilizar excavaciones cercanas a edificios, para estabilizar taludes o incluso para permitir el paso de túneles bajo estructuras antiguas.

La construcción de micropilotes raíz (*palo radice*) la inició a principios de la década de los cincuenta en Italia la firma Fondedile, cuyo director técnico era Fernando Lizzi. Después de esto, se exportó esta técnica a otros países de Europa en los años sesenta y a mediados de la década de los setenta se llevó a Estados Unidos. Por un problema de patentes a nombre de los italianos, en Estados Unidos se denominaron micropilotes (*micropiles*) y recientemente se adoptó el nombre de *root piles*. Su uso se ha esparcido por varios países del mundo —pues son de gran utilidad—, entre estos Colombia, a donde entraron a principios de los años ochenta.

Debemos aclarar que en muchos libros de fundaciones y geotecnia se incluye bibliografía acerca de este tipo de cimentación y que buena parte de la información aquí contenida se basa en el manual *Micropile design and construction*, del Departamento de Transportes de Estados Unidos, ya que este manual contiene toda la información básica necesaria para el diseño y la construcción de los micropilotes inyectados a presión. Entre los libros de geotecnia en los que aparecen capítulos con este tema se destacan *Manual de técnicas de mejora del terreno* (cap. 7), de Ana Bielza Feliú, y *Ground control and improvement*, de Petros P. Xanthakos, Lee W. Abramson y Donald A. Bruce.

El término *micropilotes* se puede utilizar para describir pilotes de pequeño diámetro y de longitudes relativamente cortas. Sin embargo, con base en su uso en Estados Unidos, la palabra *micropiles* se refiere principalmente a los pilotes pequeños, pero de gran longitud, inyectados a presión, esto es, a los pilotes raíz. Estos son muy diferentes de los pilotes pequeños, ya que tienen longitudes importantes, superiores en

muchos casos a 20 y 30 m y hasta 70 u 80 m, con diámetros entre 15 y 30 cm. Las presiones de inyección varían entre 5 y 10 atm —en suelos más blandos—, y pueden llegar a más de 20 o 30 atm. Además, los micropilotes raíz trasladan el ciento por ciento de su carga al suelo de fundación mediante el refuerzo, pues el mortero con el cual se construyen no tiene una gran resistencia a la compresión; por lo tanto, la transmisión de esfuerzos se hace por fricción entre el mortero y el suelo circundante, a una profundidad tal que estos suelos sean más estables (capas de suelo más competentes). La punta no es capaz de soportar cargas altas debido a que su área es pequeña.

A continuación, se describen las características de diseño para los micropilotes raíz individuales y para los grupos de pilotes (micropilotes reticulados). Como se verá, los sistemas de diseño son similares a los de los pilotes de gran diámetro y profundidad; la diferencia es que estos, por estar inyectados a presión, pueden soportar cargas más altas de las que corresponden a su diámetro, aparte de que se pueden construir en espacios muy reducidos, con máquinas pequeñas.

INTRODUCTION

Micropiles, also known as root piles have important applications in underpinning and in the stabilization of soils that may present stability problems. These elements have a small diameter and transfer loads to more competent soil layers at greater depths. They can be installed using drilling equipment capable of operating in restricted or difficult-access locations. For this reason, their applications include underpinning buildings that experience excessive total or differential settlement. They are also used to stabilize excavations near existing structures, reinforce slopes, and allow tunnel construction beneath old buildings.

The construction of root piles began in the early 1950s in Italy by the company Fondedile, whose technical director was Fernando Lizzi. Subsequently, the technique spread to other European countries during the 1960s and was introduced in the United States in the mid-1970s. Due to patent issues associated with the Italian technology, these elements were referred to in the United States as micropiles. Today, this term is widely used internationally. Their application has expanded to several countries worldwide, including Colombia, where they were introduced in the early 1980s.

Numerous geotechnical and foundation engineering books include references to this type of foundation. Much of the information presented in this study is based on the manual *Micropile Design and Construction*, published by the U.S. Department of Transportation, which provides fundamental guidelines for the design and construction of pressure-grouted micropiles. Among the geotechnical engineering references that address this topic are *Manual de técnicas de mejora del terreno* (Chapter 7) by Ana Bielza Feliú and *Ground Control and Improvement* by Petros P. Xanthakos, Lee W. Abramson, and Donald A. Bruce.

The term micropiles refers to piles with small diameters and relatively long lengths. In practice, however, micropiles are typically slender elements installed using pressure grouting techniques. They differ from conventional small piles because they can reach considerable lengths, often exceed 20 or 30 m and sometimes reach depths of 70 or 80 m, with diameters ranging from approximately 15 to 30 cm. Grouting pressures typically vary between 5 and 10 atm in softer soils and may exceed 20 or 30 atm in certain conditions.

Root micropiles transfer most of their load to the surrounding soil through friction along the grout-soil interface, as the grout itself does not typically provide high compressive strength. Therefore, load transfer occurs primarily through skin friction between the grout and the surrounding soil layers, which are usually more stable and competent at greater depths. The pile tip contributes little to load resistance because of its relatively small area.

The design characteristics of individual root micropiles and micropile groups (micropile meshes) are presented below. As it will be shown, the design procedures are similar to those used for large-diameter deep foundations. However, because micropiles are installed using pressure grouting, they can sustain higher loads relative to their diameter. In addition, they can be constructed in very confined spaces using relatively small drilling equipment.

CÁLCULO DE CAPACIDAD

El cálculo de los micropilotes comprende cuatro etapas o fases claves:

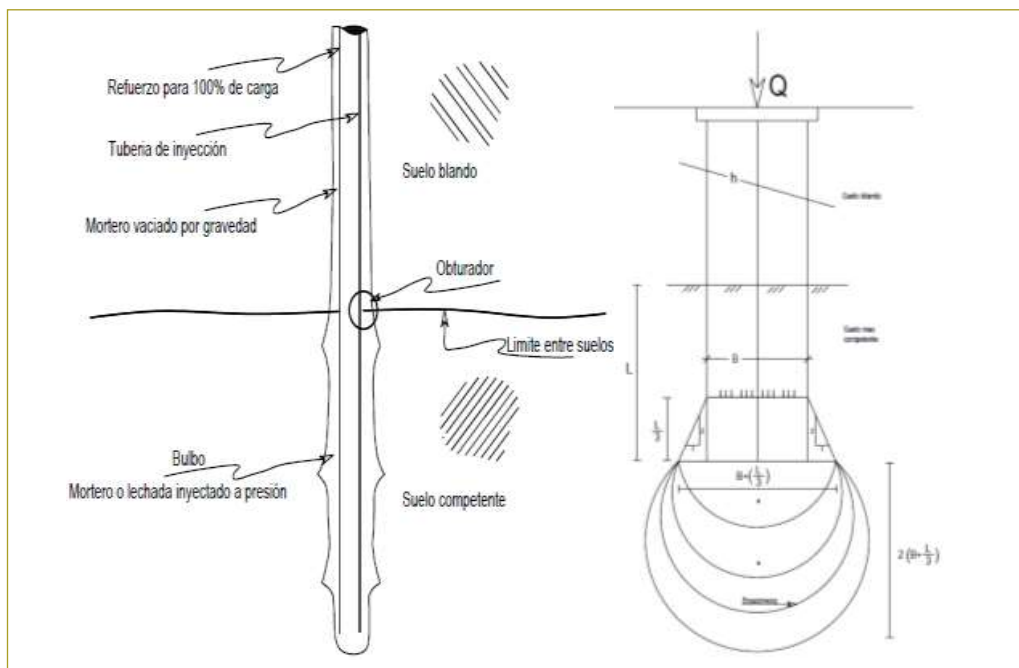
1. **Cálculo de la capacidad de soporte de un pilote en el suelo.** En los casos que se presentan más adelante se trata de establecer la capacidad por fricción (la punta tiene un área pequeña) en suelos compactos o de mejor capacidad que se encuentran por debajo de suelos muy blandos, los cuales hay que atravesar para lograr el soporte o la estabilización de la superestructura. Es lo mismo que la capacidad por fricción de pilotes grandes (de mayor diámetro), pero en razón de que son inyectados a presión se pueden emplear diámetros de diseño de hasta 1,5 veces el diámetro de perforación real (el diámetro se incrementa con la presión de inyección, lo cual se puede comparar con el consumo de mortero).
2. **Cálculo del refuerzo conformado por varillas de acero o por el tubo de acero autoperforante mediante el cual se inyecta el mortero (perforaciones y manguitos de caucho, así como obturadores).** El refuerzo debe ser capaz de soportar el 100 % de la carga a la falla (según diseño) del micropilote a compresión, puesto que en este caso el mortero es incapaz de soportar cargas altas a la compresión.
3. **Revisión de que el mortero puede soportar las varillas o tubo por fricción y trasladar estas cargas al suelo de soporte.** Las varillas o refuerzo no se pueden enterrar o fallar en la superficie del mortero; por lo general, los micropilotes cumplen este requisito con facilidad.
4. **Chequeo de que, además de la capacidad individual, la capacidad del grupo de pilotes no excede la resistencia al corte ni los asentamientos permitidos, según el proyecto.** Generalmente, se usan grupos de dos, tres o cuatro micropilotes que no sobrecargan el terreno, pero esto se debe revisar cuidadosamente y establecer la separación mínima entre los elementos.
5. **Dependencia de los micropilotes al refuerzo de acero.** En razón de esta dependencia, es necesario tener en cuenta la corrosión y el posible deterioro, a mediano plazo, en medios agresivos.

ASENTAMIENTOS

Generalmente, un solo micropilote raíz, con parámetros de fricción y de punta en un suelo competente, por debajo del suelo blando, bien calculado, sufrirá

Figura 1. Esquema de micropilote raíz (izquierda), grupo de pilotes, capacidad de grupo y cálculo de asentamientos (derecha)

Fuente: Elaboración propia.



asentamientos a causa del acortamiento elástico del pilote (acortamiento de varillas o tubo) y no resultará en asentamientos (o muy pequeños) por consolidación de los suelos arcillosos o arenosos circundantes.

Sin embargo, el grupo de pilotes bajo un dado, bajo la placa estructural o bajo la totalidad del edificio sí puede sufrir asentamientos que se deben calcular y prever en el diseño de la superestructura. Cuando estos son altos e inadmisibles, hay que recurrir a una mayor separación de pilotes de un grupo o a un grupo de pilotes de mayor longitud o de mayor empotramiento en los suelos competentes.

Los asentamientos se calculan, como en el caso de pilotes de mayor diámetro, utilizando las ecuaciones elásticas de transmisión de esfuerzos a la mayor profundidad y las ecuaciones de consolidación unidimensional de K. Terzaghi. Por supuesto, también se pueden emplear elementos finitos, como RocScience, Midas o Sigma W, pero teniendo mucha seguridad en los parámetros de compresibilidad, coeficiente de consolidación (tiempos), niveles de drenaje en el perfil, etc. Se podría decir que hay que calibrar el programa con ensayos de consolidación sobre los suelos solicitados por el grupo.

Por ningún motivo se pueden calcular los asentamientos elásticos o inmediatos como único valor; a estos se deben sumar los asentamientos por consolidación primaria.

El cálculo de asentamientos se debe hacer como mínimo hasta una profundidad de dos veces el ancho B del grupo, medidos bajo $Z_1 + 2/3 L$ (figura 1).

OTROS USOS

Los micropilotes también se utilizan para soportar cargas de tracción, cargas horizontales (los pilotes individuales son muy esbeltos, pero como grupo funcionan bien), reforzamiento de masas de suelo en el caso de excavaciones cerca de construcciones existentes, estabilidad de taludes, etc.

En Bogotá, se recomendaron pilotes diagonales para submurar la iglesia de La Candelaria, muro al costado occidental, en la carrera 4, al norte de la calle 11, ya que esta sufrió asentamientos hacia occidente (no tenemos información de si se construyeron o no).

Hay más ejemplos, incluso de micropilotes raíz que no llegan a un manto portante; son flotantes en la arcilla blanda, pero desarrollan su capacidad con una buena longitud en la parte inferior.

En este artículo se presentan dos ejemplos que han sido exitosos: uno es la submuración del tubo de 60" (GOT-60") que va del tanque Wiesner a la planta de acueducto de Santa Bárbara, y que sufrió asentamientos de importancia (1,60 m máx.) a lo largo de la calle 114 entre carreras 7 y 9 (NQS); el otro es un edificio de 19

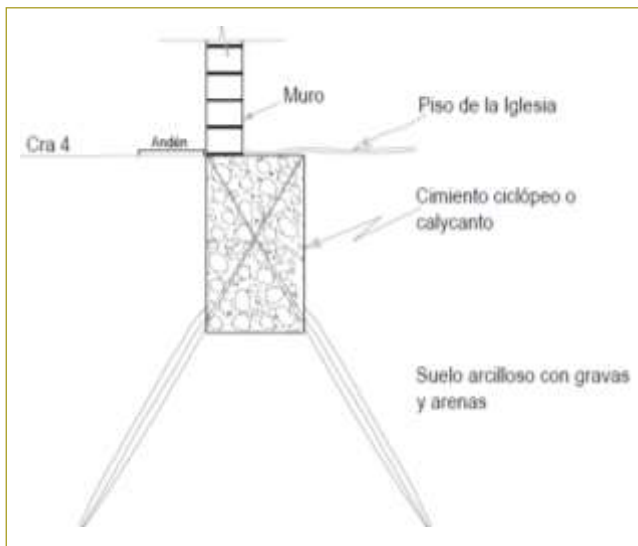


Figura 2. Pilotes diagonales de la iglesia de La Candelaria

Nota: Recomendación del ingeniero R. Maldonado.

Fuente: Elaboración propia.

pisos más sótano que estaba sufriendo asentamientos de hasta 39 cm, situado al occidente de la avenida Boyacá, apoyado adecuadamente en los materiales duros del piedemonte al occidente pero con pilotes muy cortos al oriente (zona más plana).

Caso 1. Estabilización tubo $\varnothing$ 60", Usaquén

Con anterioridad a la construcción de los edificios del Centro Empresarial Santa Bárbara se instaló un tubo de 60" de diámetro (1,52 m) en acero revestido de concreto entre la avenida carrera 7 y la carrera 9, a lo largo de la calle 114. Este tubo lleva aguas limpias del acueducto a presión (260 m) desde el tanque Wiesner —al oriente de la ciudad— hasta la planta de Santana.

El tubo, que se cimentó a una profundidad promedio de 3,7 m bajo la superficie original del terreno, sufrió

asentamientos de importancia cuando se construyeron los sótanos de los edificios de Teleport, al sur de la calle 114 (a 21,0 m de distancia a lo largo entre las carreras 7 y 9) y del parqueadero del Centro Empresarial, ubicado al norte de esta calle (a 24,0 m de distancia, como se ve en la planta de la figura 4).

Los asentamientos alcanzaron valores de 1,6 m al occidente de la rotonda y de 1,3 al oriente de la rotonda localizada hacia la mitad de la longitud de la calle 114. En el sitio de la rotonda el asentamiento fue un poco menor, cercano a 1,0 m. Este tubo lo había diseñado Ingetec, por lo cual el ingeniero Gabriel Otero analizaba el estado del tubo, sus curvaturas y deflexiones causadas por el asentamiento prácticamente todas las semanas, debido a que mientras se efectuaban excavaciones del cuarto sótano (a 15,0 m de profundidad) en el edificio Teleport el tubo sufría asentamientos de 1 cm al día, hasta cuando se interrumpían nuevamente estas excavaciones.

El perfil estratigráfico típico del piedemonte tiene limos y arcillas de 3,0 o 4,0 m de espesor, y de este nivel hacia abajo hay capas de arena intercaladas con los limos blandos que predominan en el perfil; es de anotar que prevalece una capa de arenas con agua a presión entre 23,0 y 25,0 m de profundidad. Por debajo de estos suelos hay limos blandos, una delgada capa de turba, y entre los 33,0 y 43,0 m bajo la superficie, aproximadamente, aparecen gravas con arena intercaladas con delgados lentes de limo. Se adjunta un perfil estratigráfico típico que, por lo demás, era bastante variable (figura 5).

El nivel de agua freática está a profundidades entre 1,0 y 3,0 m, pero al llegar al nivel de las arenas, a 23,0 m, el agua se encuentra sometida a presión artésiana y se eleva hasta alturas superiores a 5,0 o 6,0 m por encima del nivel del terreno. Esta es una condición típica de los terrenos del piedemonte entre la carrera 7 y la carrera

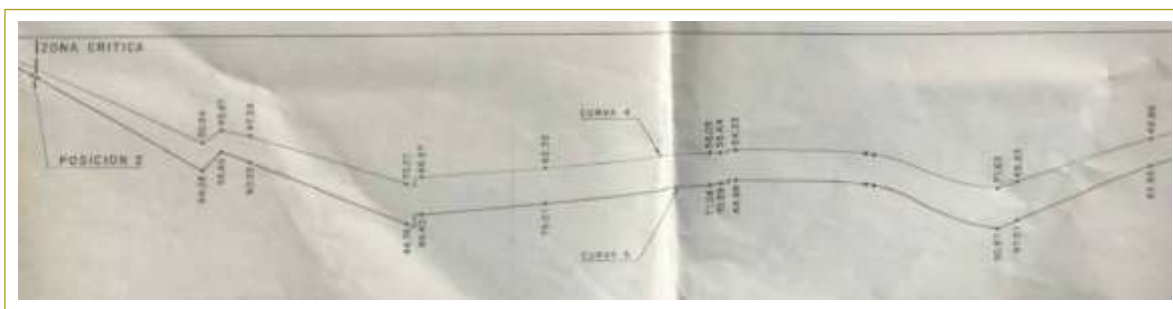


Figura 3. Asentamientos del tubo en una de estas etapas (30 de marzo de 1995)

Fuente: Elaboración propia.

9 desde Chapinero hasta el norte de la calle 150, pero no en todos los casos es igual, ya que el piedemonte se aleja hacia el oriente en algunos puntos.

A causa de los asentamientos se tuvo que interrumpir el servicio de agua alimentado por este tubo en dos o tres ocasiones, cada vez que se observaba que las deformaciones por curvatura del tubo eran tan altas que este se podría fracturar y, por consiguiente, causar un daño incalculable en la zona. En estas ocasiones se instalaron uniones Dresser, diseñadas por American Pipe. En el plano presentado en la figura siguiente (figura 4), con la localización del tubo aparecen los sitios donde fue necesario instalar la unión Dresser para evitar la rotura; en total, se instalaron cuatro uniones Dresser entre las carreras 7 y 9 y una quinta de estas al oriente de la carrera 7. Por supuesto, cada vez que se cortaba el tubo para la instalación de la unión debidamente preconstruida se relajaban los esfuerzos en el sitio de la curvatura, además de que la unión Dresser permitía deformaciones angulares adicionales del tubo de 1° a 3°.

Sin embargo, hubo que dar una solución definitiva a la cimentación del tubo, puesto que no se podía permitir que este siguiera sufriendo asentamientos de importancia a mediano o largo plazo. Inicialmente, se programaron inyecciones de mortero seco (1" Slump) a gran presión, pero después de efectuadas las primeras inyecciones en la zona de mayor asentamiento se observó que el movimiento se aceleraba luego de inyectado el terreno, posiblemente por el exceso de presión de poros que generaban estas inyecciones, y que al disiparse resultaba en asentamientos rápidos. Se escogió, por lo tanto, una cimentación con micropilotes (pilotes raíz inyectados a presión), fundados en las gravas o suelos más competentes entre los 33,0 y 43,0 m de profundidad (figura 5).

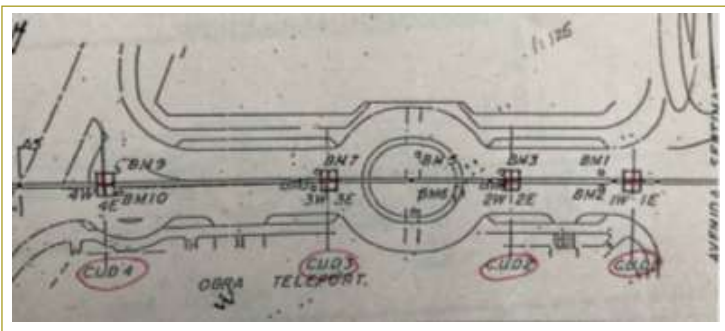


Figura 4. *Planta del tubo.*

Fuente: Elaboración propia.

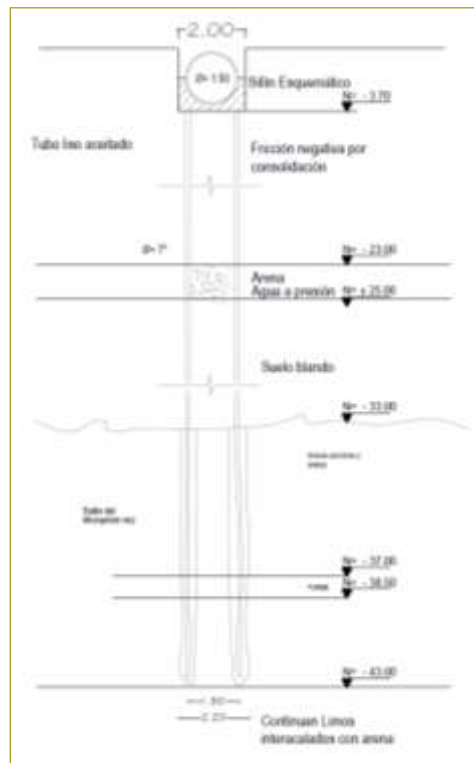


Figura 5.
Esquema de sillines y micropilotes.

Fuente: Elaboración propia.

Cada 8,0 m a lo largo de la longitud del tubo se construyeron sillines bajo el tubo, que estarían soportados a su vez por micropilotes fundados a las profundidades anotadas. Cada sillín estaría soportado por dos pilotes con 200 T de capacidad cada uno a la falla (400 T los dos micropilotes), los que, por consiguiente, trabajarían para el soporte de 100 T por elemento (200 T de trabajo por cada sillín).

Se estableció que el tubo, en 8,0 m de longitud aferrante a cada sillín, pesaba unas 80 T, por lo que cada pilote tendría que soportar 40 T, correspondientes a la mitad de las 80 T en los 8,0 m. Adicionalmente, se calculó una fricción negativa por asentamiento de la sabana del orden de 60 T por pilote, y pese a que este se construyó siempre con un tubo de acero liso aceitado hasta 33,0 m de profundidad, se estimó que el terreno lateral podría generar cargas negativas con este orden de magnitud.

Se efectuó un ensayo de carga estático, con control de carga, sobre un micropilote inyectado a presión, construido por fuera de la proyección del tubo, hacia el norte de este y en el tercio occidental del área de influencia del tubo. Salazar Ferro Ingenieros y los ingenieros de nuestra oficina no solamente diseñaron esta prueba de carga, sino que determinaron cómo serían



Figura 6. Fotos del ensayo de carga (izquierda) y del tubo destapado para construcción de sillines (derecha)

Fuente: Elaboración propia.

los incrementos de carga y hasta qué carga se llevaría a cabo la prueba. Se adjunta una foto de la prueba y los resultados de esfuerzo deformación (figuras 6 y 7).

Gracias a esta prueba se comprobó que la capacidad de carga para cada pilote era de cerca de 200 T a la falla y, por lo tanto, que sería una solución aceptable a largo plazo para estabilizar la tubería. Cabe anotar que en el grupo de estudios y diseños tanto de la tubería como de los suelos en la zona había ingenieros de Ingetec, de la oficina del ingeniero Roberto Maldonado (suelos de Teleport), de nuestra oficina (suelos de los edificios al norte de la calle 114), asesores de la Empresa de Acueducto

como Álvaro Jaime González (quien aprobó el diseño de la prueba de carga y sus resultados), ingenieros de la firma de Pablo Sáenz y Cía., constructores de Teleport e ingenieros de la firma Prosantana, constructores del parqueadero al norte de la calle 114.

2. Caso 2. Control de asentamientos de un edificio de 19 pisos, Colina Campestre

Este edificio quedó bien cimentado al costado occidental, en la zona más alta del terreno, mediante pilotes de 19,0 m de longitud que penetraban en las gravas y además en las arcillolitas subsiguientes que se encuentran allí desde 15,0 m de profundidad. El mismo edificio al costado oriental contó con pilotes de 19,0 m que no llegaron a las gravas y menos aún a las arcillolitas que se encuentran en este sitio por debajo de 28,0 o 29,0 m bajo la superficie, todo esto en un terreno relativamente plano, piedemonte oriental del cerro de Suba (figura 8).

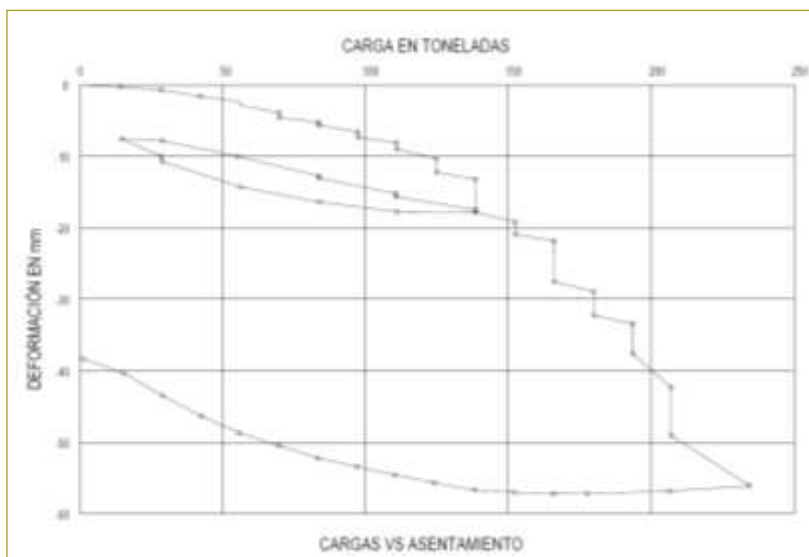
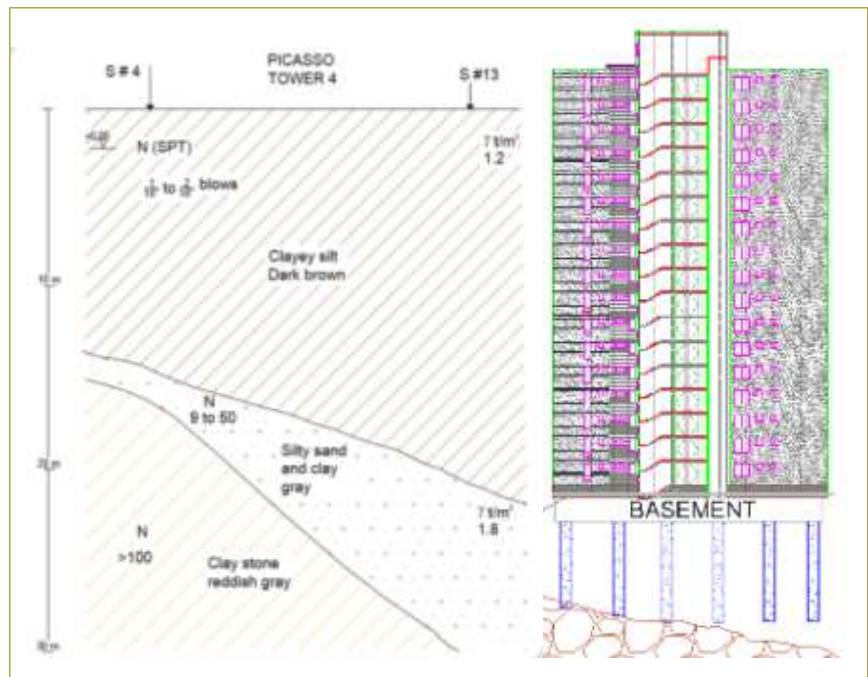


Figura 7. Resultado del ensayo de carga

Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Perfil estratigráfico del piedemonte (izquierda) y esquema ilustrativo de la cimentación hecha (derecha).

Fuente: Elaboración propia.



Una vez hechos los pilotes y cuando la torre de 19 pisos estaba en construcción, hacia fines del 2011 y principios del 2012, se notó un mayor asentamiento del edificio hacia oriente; en dos meses alcanzó a descender unos 8 cm hacia este extremo. Ante esta circunstancia se decidió estabilizar el edificio, puesto que los asentamientos diferenciales hacia oriente no disminuían. Lo primero fue diseñar los micropilotes raíz bajo los dados de los pilotes construidos inicialmente, pero en este caso llegando a los suelos duros y penetrando en

estos al menos 5,0 m ($\varnothing$ teórico = 15 cm QT/pilote = 40 T). Se presenta un plano (figura 9) con la localización de los pilotes originales y la localización de los micropilotes o pilotes raíz inyectados a presión, plano en el que también se observa el asentamiento que alcanzó a presentarse en el periodo de tiempo entre la construcción de la torre, a fines de 2011 y principios de 2012, y el momento en el que fue posible construir los micropilotes y vincularlos a la torre.

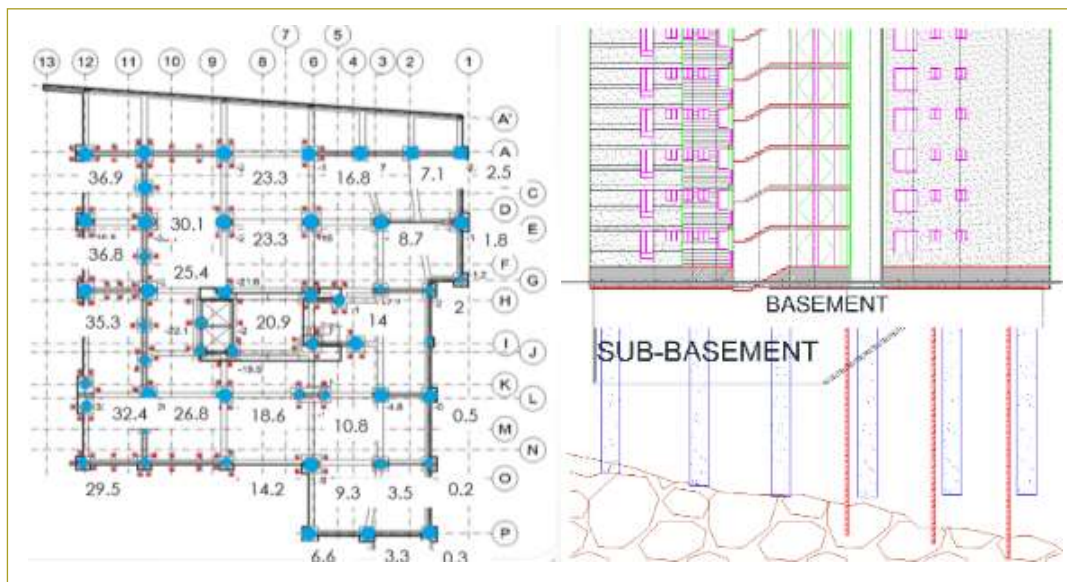


Figura 9. Planta del edificio con pilotes, micropilotes y asentamientos diferenciales (izquierda) y esquema del reforzamiento hecho (derecha).

Fuente: Elaboración propia.

Este edificio se asentó 37 cm hacia oriente y la solución, además de estabilizar la torre, fue enderezarla, lo que permitió su asentamiento hacia occidente, asentamiento que se consiguió cortando los pilotes originales y permitiendo el descenso con gatos hidráulicos y mecánicos. Todo se analizó cuidadosamente; la Universidad de los Andes estudió el comportamiento de la torre a medida que se presentaba el movimiento de verticalización con programas de elementos finitos en tres dimensiones, con el fin de garantizar que este movimiento no generaba esfuerzos excesivos en la torre, ya construida hasta el piso 19. Salazar Ferro realizó la obra y Cusezar, firma propietaria, facilitó todos los elementos necesarios para lograr la verticalización con asentamiento de 37 cm hacia occidente. También es importante anotar la contribución de PyP Ingenieros Calculistas, empresa representada por Armando Palomino, que imaginó y diseñó todos los pasos de la obra (la obra se debe principalmente a él); nuestra oficina participó en los análisis de cimentación y en las recomendaciones para la estabilización.

A continuación se presenta, además de la localización de pilotes y micropilotes, el proceso de verticalización con una duración de ocho meses (figura 10).

CONCLUSIONES

Se ha hecho un compendio de recomendaciones para el cálculo de capacidad de soporte y asentamientos de estructuras cimentadas o repotenciadas con micropilotes. Los dos casos presentados para la estabilización del tubo a presión de la calle 114, entre carreras 7 y 9, y la estabilización del edificio Picasso han sido exitosos a largo plazo en la estabilización y el buen comportamiento de estas estructuras.

Cimentar o submurar con micropilotes raíz es una opción valiosa para fundar edificaciones con problemas o para hacer cimentaciones en espacios muy limitados. En Bogotá, la cimentación con micropilotes raíz se está utilizando aproximadamente desde 1985 y ya hay un buen número de edificios que muestran excelente comportamiento con este tipo de fundación.

En este artículo no se presentan otras aplicaciones de los micropilotes raíz, tales como la estabilización de excavaciones, la solución de problemas de estabilidad de taludes y, posiblemente, excavaciones bajo edificaciones

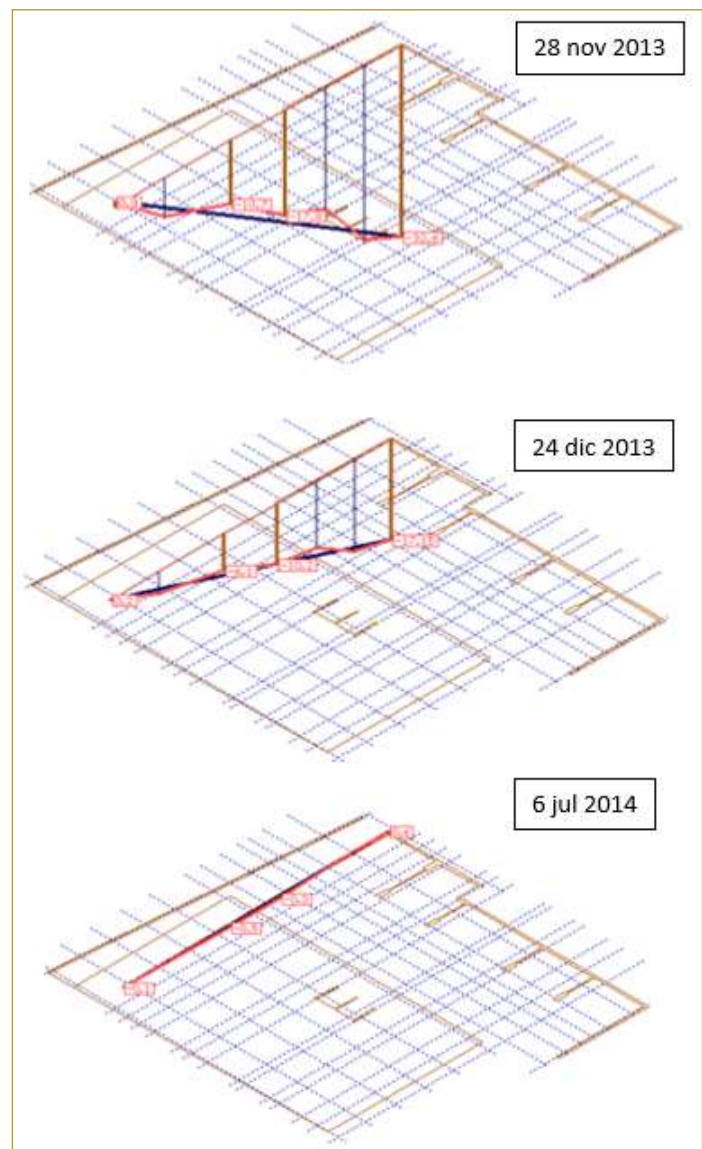


Figura 10. Figuras ilustrativas del proceso de asentamiento del eje A durante la verticalización.

Fuente: Elaboración propia.

antiguas que son de conservación. Estas aplicaciones serían objeto de otro artículo.

Agradecimientos

Agradecemos a los ingenieros que participaron en la estabilización de la tubería de 60" en la calle 114, en especial al ingeniero Jaime Beltrán, gerente de toda la operación. Igualmente, les damos las gracias a los profesionales de la firma Cusezar, al ingeniero Francisco Salazar Ferro y el ingeniero Armando Palomino, quienes ayudaron a que el proceso de estabilización

y verticalización de la torre de 19 pisos fuera todo un éxito.

Así mismo, agradecemos a nuestra asistente ejecutiva, la señora Sonia Cruz, por su paciencia y los consejos dados durante la elaboración de este artículo.

Autoría

Los autores contribuyeron en conjunto a la concepción del artículo, el desarrollo del marco teórico y el análisis de los casos de estudio. Todos los autores revisaron y

aprobaron la versión final del manuscrito, y además declararon no tener conflicto de intereses en relación con este artículo.

REFERENCIAS

- Bielza, A. (1999). *Manual de técnicas de tratamiento del terreno*. Entorno Gráfico.
- Federal Highway Administration (2005). *Micropile design and construction* (publication FHWA NHI-05-039, NHI Course 132078).
- Xanthakos, P., Abramson, L., & Bruce, D. (1994). *Ground control and improvement*. John Wiley & Sons.