

Aplicación de micropilotes empujados hidráulicamente a recalces de estructuras

Application of Hydraulically Driven Micropiles to Underpin Structures

Antonio Javier Prados Sáez^{1*}, Gustavo Armijo Palacio²

Resumen

Las diferentes técnicas de recalce empleadas en España (micropilotes convencionales y diferentes tipos de inyecciones) presentan varios inconvenientes relacionados con la dificultad de acceso al lugar de trabajo, dada la anchura y gálibo necesarios para la maquinaria de perforación e inyección. Además, se requiere de espacio adicional para las instalaciones de inyección y de gestión de residuos.

De forma alternativa, los micropilotes empujados hidráulicamente usando el peso de la estructura a recalzar como reacción, podrían solucionar los problemas de las técnicas mencionadas con anterioridad. La principal ventaja de este sistema es su facilidad de acceso a espacios reducidos. Además, su procedimiento constructivo en sí mismo proporciona una prueba de carga que verifica la carga de hundimiento real del terreno, así como la integridad de los demás elementos del sistema. Otra de sus ventajas es que no requiere de inyección posterior ni extracción de terreno.

Este sistema de micropilotes aún no es muy conocido en España y, dada la falta de información técnica disponible, pocos ingenieros y arquitectos están familiarizados con sus potenciales aplicaciones. Para exponer sus capacidades y ventajas ha sido recogida diversa información técnica e imágenes de empresas estadounidenses y españolas que emplean este tipo de micropilotes, junto con recomendaciones de diseño e instalación.

En el apartado de diseño, ha sido realizada una tabla comparativa que reúne la posible mejora de la resistencia por fuste por desplazamiento del terreno al hincar el micropilote, según distintas normativas. Además, se añade una ecuación empírica que permite realizar estimaciones aproximadas de la carga de hundimiento según el SPT y el tipo de terreno.

Palabras clave: micropilote, recalce, asiento, gato hidráulico.

Abstract

The various underpinning techniques used in Spain (drilled micropiles and different types of grouting) have several issues related to the difficulty to access the workplace because of the width and headroom needed for the drilling and grouting equipment. Additional space is also required for grouting and waste management facilities.

Alternatively, hydraulically driven micropiles (also known as push piers), which are pushed into the ground by using the weight of the structure to be underpinned, could solve the problems outlined above. The main advantage of this system is to make the access to narrow and low headroom spaces easier. Besides, the construction procedure itself provides a proof load test, which confirms the real load bearing capacity of the soil and the integrity of the system. In addition, there is no need to grout or extract materials from the site.

This micropile system is not yet widely known in Spain and, given the lack of technical information available, few engineers and architects are familiar with its potential applications. To present the capabilities and advantages of this system, various pieces of technical information and pictures have been gathered from North American and Spanish companies, together with recommendations for design and installation.

In the design section, a comparative table has been completed gathering the improvement of the shaft resistance by displacement of soil when driving the micropile, in accordance with different standards. Furthermore, it has been added an empirical equation to roughly estimate the load-bearing capacity according to SPT value and the type of soil.

Keywords: push pier, jacked pier, underpinning, settlement, hydraulic ram.

1. INTRODUCCIÓN

Esta tipología de micropilotes está formada por tramos de tubería de acero estructural, que son introducidos en el terreno sucesivamente mediante el uso de un cilindro hidráulico fijado a la cimentación a través de una grapa o elemento de conexión. De esta forma el peso propio

de la estructura es empleado como reacción para la hincada del micropilote, evitándose recurrir a lastres o maquinaria de grandes dimensiones. Un esquema general del sistema de micropilote estándar empleado en EEUU se ilustra en la figura 1.

En EEUU y para aplicaciones a compresión, la unión entre tramos de micropilote más empleada es la soldadura a la parte inferior de cada tubería de un tubo de menor diámetro, que es introducido en la siguiente por deslizamiento. Esta unión se muestra en la figura 2.

Su sección suele tener un diámetro inferior a 100 milímetros. Normalmente, la longitud estándar de cada tramo

* Autor de contacto: apradossaez@gmail.com

¹ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Granada.

² Geotecnia y Cimientos S.A., Madrid, España.

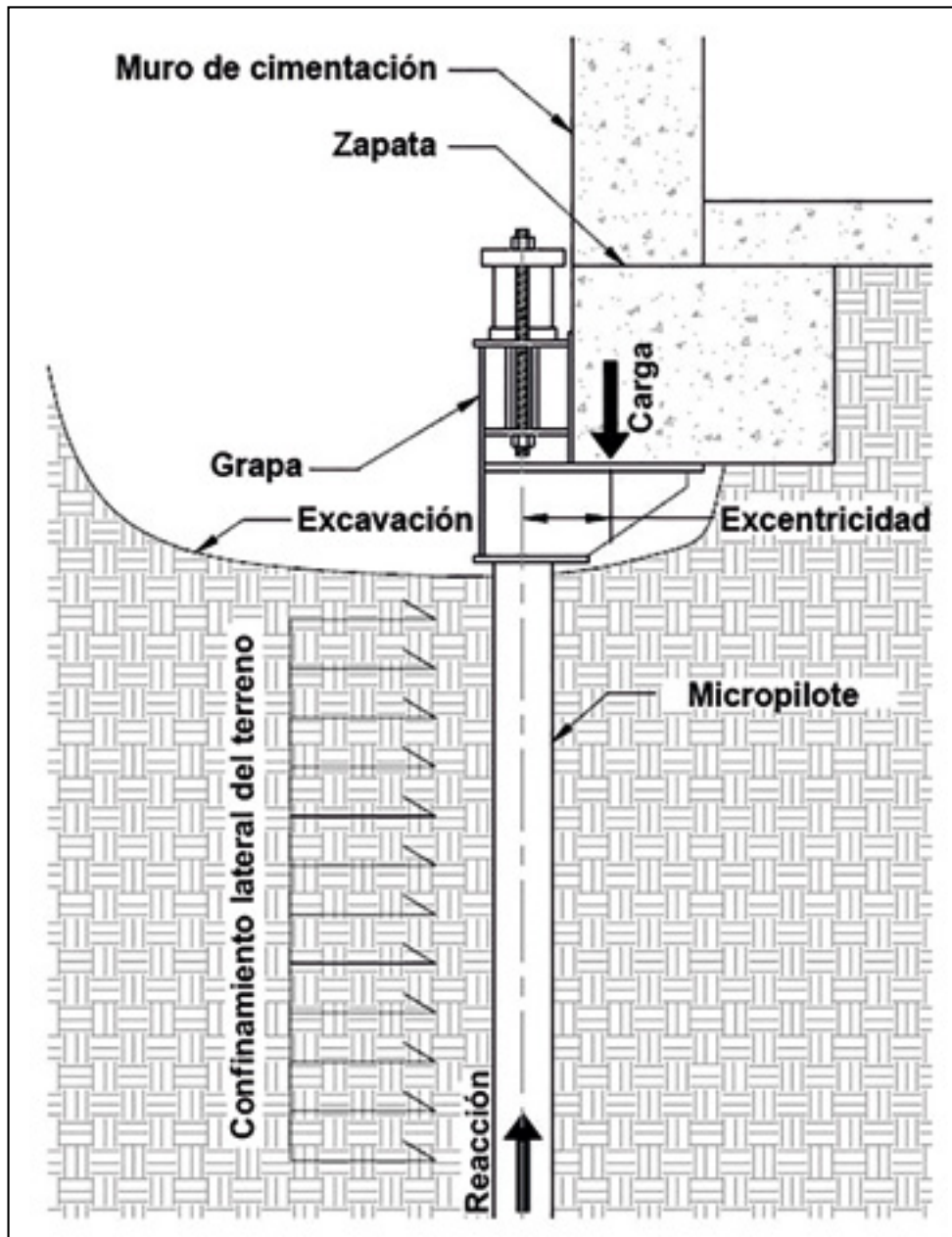


Figura 1. Esquema de micropilote y grapa. Adaptado de Supportworks, 2017.

de tubería es de 1 metro. Sin embargo, para aplicaciones en espacios de gálibo reducido se emplean tramos de tubería de longitud inferior. Dada su esbeltez, esta sección es muy sensible a los esfuerzos de flexión introducidos por la presencia de cargas excéntricas. Estas cargas son generadas por la dificultad de instalar el micropilote coincidente con el eje central de las cargas transmitidas por la estructura.

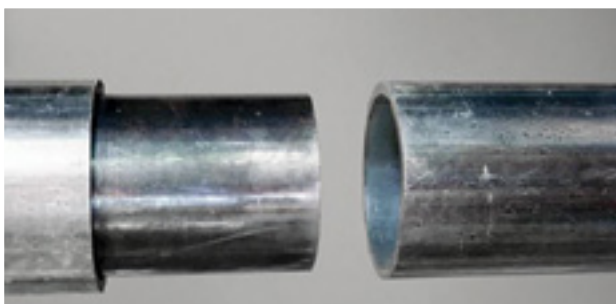


Figura 2. Ejemplo de unión de micropilotes empujados. Supportworks, 2017.

Para materializar la unión del micropilote con la estructura, logrando la transferencia de cargas entre ambos, se emplea una grapa de conexión de acero de alta resistencia. Existen distintos tipos de grapas de diferentes tamaños. En la figura 3 se presentan algunos tipos de grapas comercializadas por Supportworks (2017).

La primera grapa (under-footing bracket) por la izquierda es colocada bajo la cimentación, pudiendo ser adosada a la cara lateral de ésta. La segunda (flush-mount bracket) sólo puede ser atornillada a la cara lateral de la zapata o muro de cimentación. En cambio, la tercera (slab bracket) está concebida para ser instalada bajo una losa de cimentación.

Para disminuir la energía necesaria para hincar el micropilote en el terreno, se coloca un ensanche puntual en el inicio del primer tramo de tubería a introducir. Este elemento recibe el nombre de **collar de fricción** (véase figura 4) y reduce considerablemente el rozamiento del micropilote con el terreno, concentrándolo en su punta y permitiendo lograr mayores profundidades con una menor energía

de empuje. El resultado es un micropilote que inicialmente genera la mayor parte de su capacidad resistente por punta (Supportworks, 2017).

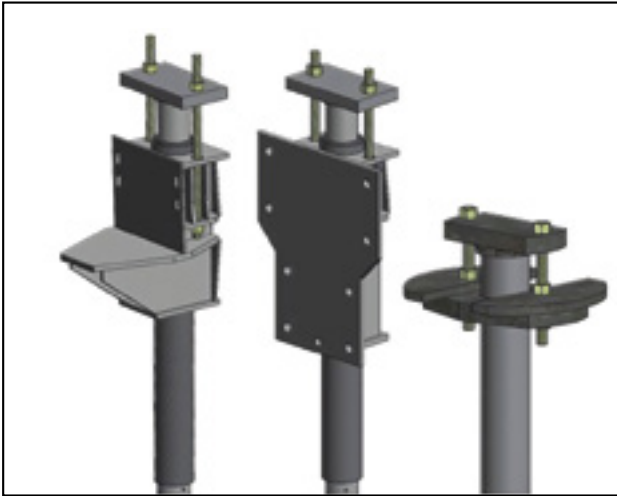


Figura 3. Ejemplo de grapas de conexión. Supportworks, 2017.



Figura 4. Collar de fricción. Supportworks, 2017.

Algunas de las aplicaciones para las que han sido empleados estos micropilotes son:

- Refuerzo de cimentaciones de hormigón armado en edificios de nueva construcción ubicados sobre terrenos con características geotécnicas deficientes, o en edificios existentes que requieren aumentar su carga sobre terrenos con limitaciones de capacidad portante.
- Recalce de edificios existentes con patologías (grietas, fisuras) debidas a un asiento total excesivo o asientos diferenciales del terreno subyacente a la cimentación, pudiendo llegar a conseguir el cierre de las grietas existentes.
- Tratamiento de colapsos y fenómenos de hinchamiento del terreno, relacionados con arcillas expansivas.
- Proporcionar soporte a la cimentación frente a excavaciones realizadas en las propiedades adyacentes.

El inventor del primer sistema de micropilotes empujados en Estados Unidos fue Jules Breuchaud en 1896. En su patente, se especificaba el uso de cilindros hidráulicos (3, 4) para introducir tramos de tubería (5, 6) en el terreno con el propósito de recalzar de forma provisional o permanente una cimentación. En la figura 5 puede apreciarse la instalación de vigas de acero (2, 7, 8, 9, 12, 13) a través de muros de ladrillo o mampostería (1), cuyos extremos tienen la función de apoyo de los cilindros hidráulicos.

Años más tarde, White (1917) especificaba la necesidad de adoptar un factor de seguridad de 1,50 y el uso de un manómetro para monitorizar la presión de hinca del micropilote. White (1931) recomendaba la hinca individual de cada uno de los micropilotes a ejecutar. Una vez finalizada la fase de hinca, mediante la carga simultánea de todos los micropilotes se conseguía una distribución uniforme de las cargas estructurales.

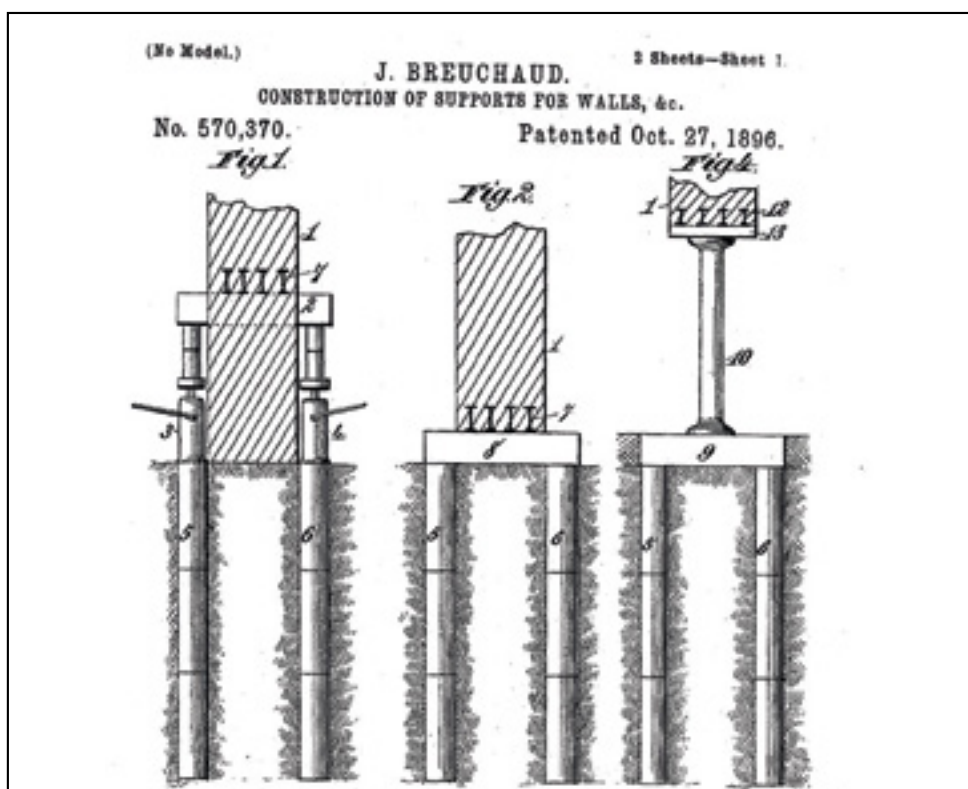


Figura 5. Primer sistema de micropilotes empujados. Breuchaud (1896).

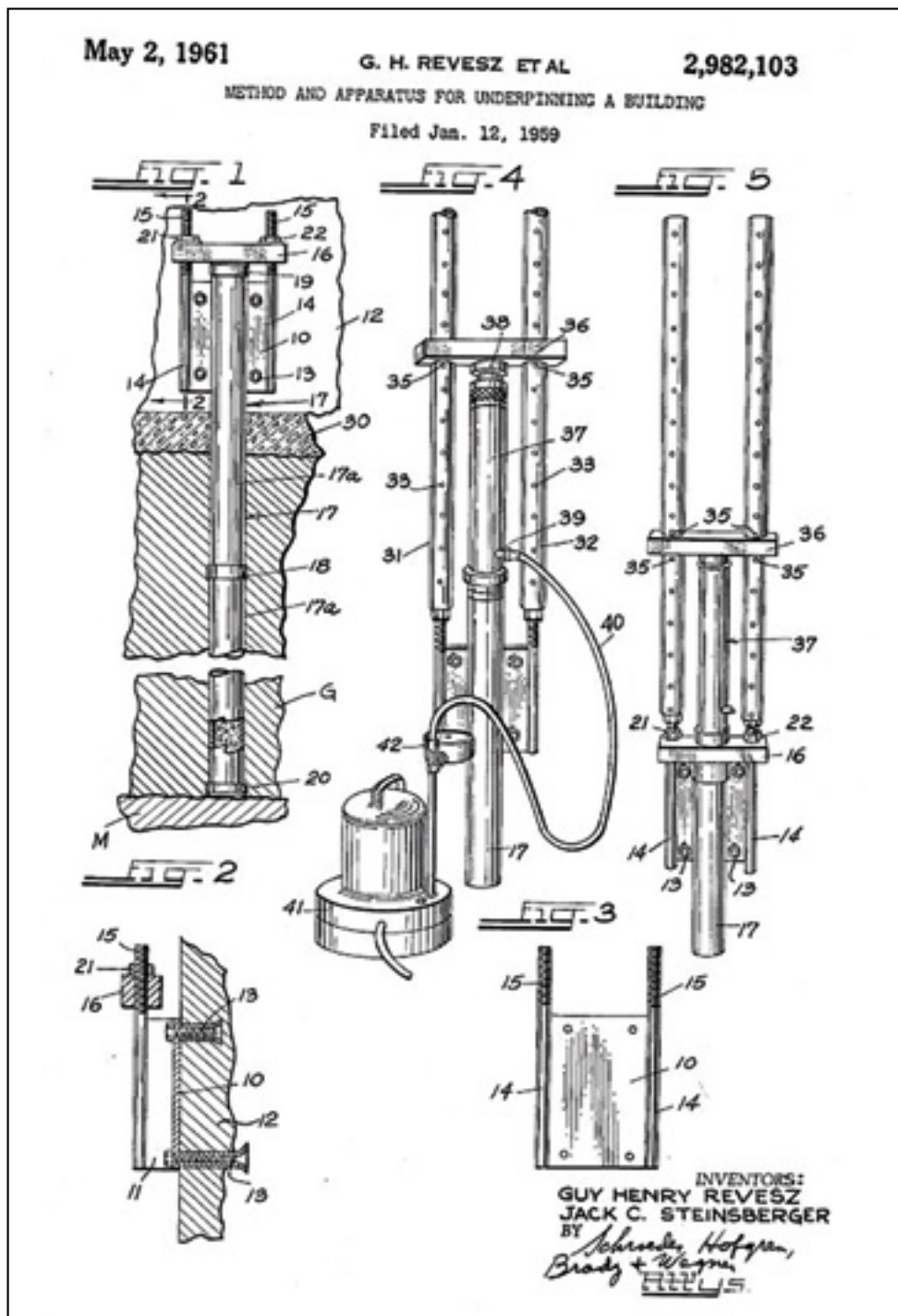


Figura 6. Primer sistema con grapa de conexión a la cimentación. Revesz y Steinsberger, 1961.

La invención de Breachaud (1896) fue mejorada por Revesz y Steinsberger (1961), alcanzándose un aspecto muy similar a los sistemas empleados en la actualidad. Una imagen de esta patente se muestra en la figura 6, donde se observan los siguientes elementos: grapa de conexión a la cimentación (14), collar de fricción (20), cilindro (37) y una pequeña bomba hidráulica (41).

Un caso actual de aplicación de estos micropilotes, para un recalce de una vivienda unifamiliar, puede verse en la figura 7.



Figura 7. Recalce de vivienda en Salt Lake City (EEUU). Cortesía de Interwest y Magnum Piering Inc, 2017.

2. ASPECTOS BÁSICOS DE DISEÑO

Con carácter general, el procedimiento que debe seguirse para diseñar una solución de recalce con micropilotes empujados comprenderá las siguientes fases:

a. Determinación de las cargas de la estructura.

Cálculo estructural, según normativa local, de las cargas transmitidas al terreno por la edificación (sin mayorar), como: pesos propios estructurales, cargas muertas, sobrecargas de uso y nieve, viento, sismo... Con este cálculo se obtiene la carga total por $m^2(Q)$ que la cimentación transmitirá al terreno.

b. Realización del informe geotécnico.

El informe deberá orientarse a:

- Localizar la profundidad de un estrato resistente que ofrezca una resistencia en punta adecuada para el micropilote.
- Establecer la ubicación de cualquier zona de suelo débil o con huecos y cavidades, en la cual deberá considerar la estabilidad del micropilote (pandeo).
- Determinar si existe cualquier barrera para instalar el micropilote a la profundidad requerida que podría requerir una perforación previa (escombros, cantos rodados o bolos, zonas con rocas duras, etc.).
- Realizar una evaluación preliminar del potencial de corrosión del suelo.

c. Evaluación de la viabilidad de usar el sistema.

La viabilidad de una solución de recalce con micropilotes empujados es función del estado de la cimentación y las cargas transmitidas por la estructura a recalzar, junto con las características geotécnicas del terreno.

La estructura tendrá una integridad adecuada y peso propio suficiente para generar la reacción necesaria para introducir el micropilote en el terreno, sin levantarse ni sufrir daños.

En caso de que el peso propio de la estructura fuese insuficiente, será necesario recurrir a anclajes al terreno o lastres que proporcionen la reacción necesaria. Otra alternativa sería reducir la carga a soportar por micropilote., aumentando el número de éstos.

La capacidad resistente de la cimentación entre vanos deberá ser adecuada para resistir las fuerzas de instalación y servicio sin daño estructural. Cimentaciones formadas por piedra, adoquines, ladrillo o que estén seriamente dañadas o deterioradas pueden no ser buenas candidatas para un recalce con micropilotes empujados (Supportworks, 2017). En los casos anteriores, su capacidad podría ser mejorada construyendo una viga de cimentación o disponiendo elementos de refuerzo que permitan una mejor distribución de las cargas en la cimentación.

d. Capacidad admisible del sistema de micropilote a emplear.

La capacidad admisible del sistema a compresión (R_{adm}) se obtendrá al dividir la capacidad última (R_{ult}) dada por el fabricante, por un factor de seguridad adecuado (FS).

$$R_{adm} = \frac{R_{ult}}{FS}$$

e. Cálculo de espaciamiento entre micropilotes.

Cuando se recalcen zapatas corridas o vigas continuas de cimentación, a partir de su disposición en planta y la carga total por $m^2(Q)$, se calculará la carga lineal (P) que transmitirán al terreno. En esta carga (P), deberá ser añadido el peso del terreno existente sobre la cimentación (si lo hubiese). La carga necesaria para recalzar la estructura (P_L) será la obtenida al incrementar la carga lineal (P) en un determinado porcentaje, para así contemplar la adhesión del suelo al fondo de la cimentación y la fricción a lo largo de ésta (Kolm y Perko, 2017).

Si se disponen varios micropilotes de capacidad admisible (R_{adm}) para levantar una cimentación con carga lineal (P_L), el espaciamiento máximo entre ellos ($x_{m\acute{a}x}$) será:

$$x_{m\acute{a}x} = \frac{R_{adm}}{P_L}$$

Magnum Piering (2004) recomienda establecer un espaciamiento superior a 0,60 m o, al menos, el 10% de la profundidad media de los micropilotes instalados para evitar estudiar la eficiencia de grupo.

f. Estudio del pandeo.

La esbeltez de estos micropilotes les hace propensos a pandeo; reduciéndose su tope estructural. Generalmente, este fenómeno ocurre por un confinamiento lateral insuficiente (en suelos muy blandos y tramos donde el micropilote queda expuesto). La fase más crítica suele darse durante la hinca, ya que para garantizar un adecuado factor de seguridad a hundimiento se exige que la fuerza de hinca final sea al menos 1,50 veces superior a la carga de servicio que experimentará el micropilote durante su vida útil.

Existen dos posibilidades de actuación ante el pandeo:

1. Tener en cuenta la reducción en el tope estructural a compresión del sistema y disminuir el espaciado entre micropilotes (x) en consecuencia.
2. Elegir una nueva configuración de micropilote que ofrezca una mayor rigidez y mantenga el espaciado propuesto. Una posible actuación para aumentar la rigidez del micropilote puede ser inyectar su interior con lechada de cemento.

g. Estudio de la corrosión.

Al ser la tubería del micropilote de acero, podría experimentar corrosión a lo largo de su vida útil; reduciéndose su tope estructural. Por ello, deberá recurrirse a sobredimensionar su sección o a aplicar otras técnicas de protección como tratamientos de galvanizado, revestimientos bituminosos o protección catódica en casos extremos.

3. EJECUCIÓN

3.1. Sistema estándar en EEUU

A modo ilustrativo, se describen las distintas fases de instalación para un micropilote empujado con la grapa de conexión estándar en EEUU según Supportworks (2017) y Magnum Piering (2004). En la figura 8 se muestra imágenes de cada una de las fases.

FASE 0 – Comprobaciones previas en la cimentación existente.

Verificación de que la cimentación puede proporcionar la reacción necesaria para el sistema hidráulico de hinca, en base a su estado y materiales de construcción empleados.

Consideración de las posibles afecciones de los micropilotes a instalaciones y propiedades colindantes.

FASE 1 – Excavación bajo la cimentación.

Se excava el terreno cercano a la cimentación con el propósito de crear un hueco suficiente para la instalación de la grapa de conexión a la estructura.

La situación más frecuente es que la cimentación sobresalga respecto al muro exterior del edificio, por lo que ésta debería modificarse para permitir la conexión de las grapas tan cerca como sea posible del eje central de las cargas transmitidas por la estructura.

En caso de cimentaciones corridas, para reducir excentricidades durante las fases de hinca y puesta en carga, podría ser una buena solución instalar micropilotes a ambos lados del muro. Una solución más drástica, empleada en EEUU, es cortar la cimentación de manera que quede completamente alineada con el muro exterior.

FASE 2 – Fijación de la grapa de conexión.

La grapa de conexión es alineada y unida a la cimentación.

FASE 3 – Configuración para empuje del micropilote

Se realiza el montaje de un marco metálico, unido a la grapa de conexión, sobre el que se instalará el cilindro hidráulico. El conjunto formado por grapa, marco y cilindro deberá garantizar que las cargas sean aplicadas verticalmente y directamente sobre el eje del micropilote con la mínima excentricidad posible (Magnum Piering, 2004).

El cilindro hidráulico deberá contar con un manómetro calibrado (capaz de medir con una sensibilidad inferior al 5% de la capacidad de carga última del micropilote).

La presión hidráulica medida con el manómetro es una indicación de la fuerza ejercida sobre los micropilotes, que puede ser calculada multiplicando este valor por el área efectiva del pistón.

FASE 4 – Empuje del micropilote en el terreno.

Los micropilotes son introducidos en el terreno individualmente, introduciendo en el terreno de forma sucesiva los distintos tramos de tubería hasta que la presión

marcada en el manómetro multiplicada por el área efectiva del pistón exceda al menos 1,50 veces la capacidad de carga requerida por micropilote. El pistón del cilindro hidráulico deberá contar con suficiente recorrido para empujar completamente el tramo de tubería seleccionado. Durante esta fase debe registrarse la presión aplicada en intervalos de 1 metro.

FASE 5 – Configuración para levantamiento de la estructura.

Se desmonta el marco y cilindro hidráulico instalados en la fase 3. Se instala un nuevo cilindro hidráulico de menor recorrido y mayor precisión, que permita controlar el levantamiento (si fuera necesario) o nivelación de la estructura.

FASE 6 – Puesta en carga.

Se realiza la conexión en serie de los cilindros hidráulicos indicados en la fase anterior. Más tarde, mediante un empuje hidráulico simultáneo en cada uno de los cilindros, se aplica la fuerza final necesaria para estabilizar y levantar la estructura de manera controlada (si fuese necesario). La resistencia combinada de todos los micropilotes trabajando de manera simultánea, permite la puesta en carga o levantamiento de la estructura con cargas inferiores por micropilote a las experimentadas durante la hinca.

Durante esta fase deberá medirse el movimiento relativo del micropilote respecto a una referencia fija, de forma óptica o mediante el uso de un reloj comparador.

FASE 7 – Relleno y limpieza del área de trabajo.

La cabeza del micropilote es fijada a la grapa de conexión y se desmontan los cilindros hidráulicos. A continuación, se rellena y compacta la excavación realizada junto con la limpieza del área de trabajo.

Ensayo de prueba de carga

A pesar de que la fase de instalación constituye en sí misma una prueba de carga, la normativa local o la exigencia de control de calidad puede ser necesario la realización de ensayos adicionales. Algunas recomendaciones para la realización de este ensayo, dadas por Perko (2002), son las siguientes:

- El ensayo de prueba de carga deberá ser mantenido hasta que la tasa de asiento sea inferior a 1,6 mm/h, no siendo inferior a 0,50 h.
- El ensayo de prueba de carga no deberá exceder la carga muerta o peso propio disponible en cada ubicación del micropilote.

Para la ejecución de estas pruebas puede atenderse a lo expuesto en la norma ASTM D1143 “Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load” y Apéndice 2 “Aspectos relativos a la realización de pruebas de carga in situ” de la Guía de Micropilotes (DGC, 2005).

Un ejemplo del ensayo de prueba de carga se muestra en la figura 9.



Figura 8. Fases de instalación del sistema. Adaptado de Supportworks, 2017.



Figura 9. Ensayo de prueba de carga. Geonovatek, 2016.

3.2. Sistema CSAP

El sistema de Cimentaciones Suspendidas en Apoyos profundos (CSAP) empleado por 2PE Pilotes (2014, 2015), requiere de la construcción de una nueva cimentación que tendrá la función de transmitir los esfuerzos de la estructura a los micropilotes y ejercer de reacción para el sistema de hinca. En ella, como se puede apreciar en la figura 10, irán embebidos unos aparatos que cumplirán las siguientes funciones:

- Forzar un pasante para que, en la siguiente fase, el micropilote sobrepase el elemento de cimentación.
- Materializar un anclaje que permita la hinca de los micropilotes.
- Permitir la conexión definitiva entre la cimentación y el micropilote, garantizando así que ambos elementos funcionan solidariamente en fase de servicio.

Como ejemplo de aplicación de este sistema se muestra una de las actuaciones llevadas a cabo por 2PE Pilotes. En esta actuación, se recalzó una vivienda unifamiliar

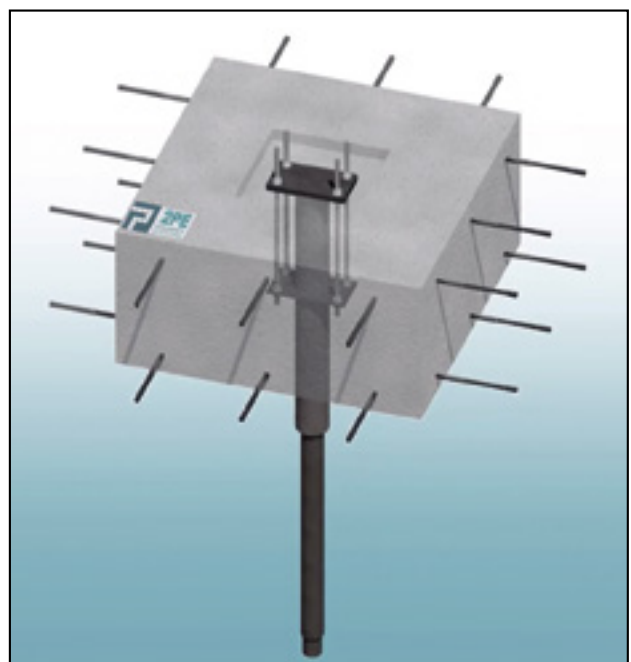


Figura 10. Sistema CSAP. 2PE Pilotes SL, 2015.



Figura 11. Instalación de aparato CSAP en nueva cimentación. 2PE Pilotes SL, 2014.

que presentaba grietas provocadas por un asiento diferencial de una de sus esquinas. Para materializar el recalce, la deteriorada cimentación fue conectada a una losa de hormigón de nueva construcción donde fueron instalados los aparatos CSAP.

Una vez finalizado el curado del hormigón de la nueva losa, se procedió a introducir los micropilotes en el terreno conectando un marco de hinca y cilindro hidráulico a los aparatos CSAP embebidos en la cimentación.



Figura 12. Hinca del micropilote en espacio con gálibo reducido. 2PE Pilotes SL, 2014.

Dado que el proceso de hinca implicaba utilizar la losa y la propia estructura como reacción del sistema hidráulico, durante el mismo se realizó un estricto control topográfico mediante un nivel láser. Se estableció un límite de sensibilidad de 2 mm, que nunca fue superado, garantizando así una mínima afección a la estructura preexistente.



Figura 13. Control topográfico de movimientos. 2PE Pilotes SL, 2014. Interwest y Magnum Piering Inc, 2017.

3.3. Sistema Lift Pile

Los componentes del sistema LIFT PILE® empleado por Geonovatek (2016), mostrados de derecha a izquierda en la figura 14, son los siguientes:

1. Micropilote MP60 de acero estructural S355, con diámetro exterior de 62 mm y espesor de 8 mm. Su exterior es sometido a un proceso de corrugación que aumenta la superficie lateral en un 46%, mejorando el coeficiente de fricción con el terreno y aumentando la resistencia de la tubería.
2. Puntaza cónica perdida para facilitar la hinca.
3. Dispositivo de precarga regulable.
4. Junta de rosca cónica con adherencia mejorada para unir los distintos tramos de tubería.
5. Sección de micropilote con junta de rosca cónica.



Figura 14. Sistema Lift Pile. Geonovatek, 2016.

Previamente al inicio del proceso de hinca, se procede a la perforación de la cimentación de un taladro circular que permita el paso de los distintos tramos de tubería que conformarán el micropilote.

Como diferencia a los sistemas descritos con anterioridad, Geonovatek emplea una máquina sobre orugas de fabricación propia con reducidas dimensiones (1,50 m de longitud, 0,75 m de anchura y 1,60 m de altura) y 500 kg de peso. En la parte frontal de la máquina es ensamblado un cilindro hidráulico que permite aplicar hasta 25 toneladas de empuje al micropilote, según se muestra en la figura 15.

Como se puede apreciar en la figura 15, dos anclajes de barra roscada son perforados en la cimentación e inyectados con resina epoxi para fijar la máquina y conseguir la reacción necesaria para la fase de hinca. En caso de losas de nueva construcción o donde no sea posible ejecutar los anclajes anteriores, Geonovatek instala un casquillo con rosca interior donde es roscada una pieza con un ensanche en su cabeza (véase figura 16). Con este artificio se consigue anclar el cilindro hidráulico a la cimentación, permitiendo el uso de ésta como reacción.



Figura 15. Hinca del micropilote. Cortesía de Geonovatek, 2017.



Figura 16. Casquillos usados para anclaje del sistema de hinca. Cortesía de Geonovatek, 2017.



Figura 17. Elevación de la cimentación con dispositivo de precarga regulable. Cortesía de Geonovatek, 2017.

Una vez finalizado la hinca, es conectado a la cabeza del micropilote el dispositivo de precarga regulable con la función de fijarlo a la cimentación. Seguidamente se procede a la precarga del micropilote, mediante el apriete con una llave dinamométrica específica, hasta alcanzar la carga última de diseño especificada en proyecto o el nivel de elevación deseado (si fuese necesario).

Para finalizar, se inyecta el taladro realizado en la cimentación con lechada de mortero expansivo de alta resistencia sin retracción para bloquear de forma definitiva el dispositivo.

En Italia, en casos de recalces o refuerzos de cimentaciones sin problemas de accesibilidad, la empresa matriz de Geonovatek emplea una máquina sobre orugas de mayores dimensiones. Esta máquina es equipada con dos cilindros hidráulicos de hinca y unos contrapesos de 50 toneladas (Track Pile), permitiendo la instalación de 2 micropilotes simultáneamente.



Figura 18. Máquina sobre orugas Track Pile. Cortesía de Geonovatek, 2017.

4. CARGA DE HUNDIMIENTO

La carga de hundimiento de un micropilote empujado aislado podrá determinarse empleando cualquiera de los siguientes métodos:

- Métodos de cálculo analíticos basados en las correlaciones con los penetrómetros dinámicos y estáticos.
- Comprobación de los parámetros de hinca (presión del manómetro del gato hidráulico a la profundidad de la punta), medidos durante la fase de instalación.
- Pruebas de carga adicionales.

En la práctica, raramente es necesario el cálculo analítico de la capacidad de un micropilote empujado, ya que como ha sido indicado con anterioridad la fase de instalación permite obtener de forma directa su capacidad. Sin embargo, en ciertas ocasiones puede ser deseable realizar el cálculo para evaluar la idoneidad de un particular estrato resistente o para estimar la profundidad de instalación del micropilote.

Para determinar la carga de hundimiento de cualquier cimentación, generalmente se minorra la resistencia del terreno entre un factor de seguridad de 3,00. Sin embargo, cuando el proceso de instalación de la cimentación incluye una medida directa o indirecta de la resistencia del suelo a la profundidad de la misma, son permisibles factores de seguridad menores. Un ejemplo tradicional es la hinca de pilotes, donde la American Society of Civil Engineers (1997) considera que un factor de seguridad de 1,50 es aceptable.

De realizarse pruebas de carga, se recomienda que sean realizadas unos días después de la instalación de los micropilotes debido a la variación en el tiempo de la mejora del terreno por desplazamiento y la disipación de presiones intersticiales (en suelos cohesivos saturados).

Resistencia por punta

Según la experiencia de Supportworks (2017), un sistema de micropilotes empujados sólo puede proporcionar soporte a la estructura a recalzar si la punta del micropilote es apoyada sobre suelos competentes o roca. Los valores recomendados de SPT para obtener una resistencia en punta adecuada son los siguientes:

- En suelos cohesivos (arcillas y limos) por encima de los 35-40 golpes.
- En suelos granulares (arenas y gravas) por encima de 30-35 golpes.

Según la Guía de Micropilotes (DGC, 2005), para poder considerar la resistencia por punta es necesario que se verifique simultáneamente, que:

- En terrenos granulares, valor del ensayo SPT (60%) según superior a 30 golpes.
- En terrenos cohesivos, la resistencia a compresión simple del terreno sea superior a 100 kilopascascales.
- La longitud de empotramiento en el terreno de características anteriores, debe ser superior o igual a seis diámetros nominales medidos sobre el plano de la punta.

Resistencia por fuste

El cálculo de la resistencia por fuste únicamente será de interés cuando la punta del micropilote no se encuentre apoyada en suelos muy duros/compactos o lecho de roca.

En estos casos no es recomendable el uso de un ensanche o sobreancho en punta (collar de fricción), por crear un espacio anular alrededor del micropilote que puede inducir perturbación o remoldeo del suelo circundante cuando éste es introducido en el terreno. De este modo, se elimina a corto plazo el mecanismo de resistencia por fuste que es el que en estas situaciones determinará la capacidad resistente del micropilote. En el largo plazo, dependiendo del tamaño del collar empleado, la fricción podría llegar a recuperarse o no.

En cambio, el uso del collar de fricción es beneficioso cuando el micropilote puede alcanzar un estrato resistente y trabajará fundamentalmente por punta, por reducir la energía necesaria para la hinca al concentrar la fricción con el terreno en el collar (eliminando el mecanismo de resistencia por fuste a lo largo del micropilote).

Recomendaciones según el tipo del terreno

Suelos cohesivos

Si el recalce se realiza en un terreno formado por suelos cohesivos saturados de baja permeabilidad, debería considerarse que la instalación de los micropilotes empujados genera elevadas presiones intersticiales, provocando una reducción drástica de las presiones efectivas del suelo. Por este motivo, el suelo no aportará inicialmente resistencia ante las nuevas cargas transmitidas. Supportworks (2017) y Magnum Piering (2004) tratan de finalizar la instalación de cada micropilote en el mismo día, facilitando su hinca al

requerirse menor energía y reacción necesaria. Igualmente, las variaciones del nivel freático no deberían menospreciarse porque podrían afectar seriamente a la capacidad del micropilote, por la reducción de las presiones efectivas.

Suelos granulares

En suelos granulares, la presión efectiva vertical tiene una gran influencia en la capacidad resistente. Por ello, cuanto más profundo sea situada la punta del micropilote, mayor capacidad resistente tendrá un depósito dado de arenas de densidad uniforme. Si se tiene un nivel freático superficial, se requerirá que los micropilotes sean instalados a suficiente profundidad para contrarrestar la reducción de presión efectiva debido a la presión intersticial.

Roca

La presencia de un lecho de roca representa una condición ideal para la transferencia por punta de las cargas de cualquier cimentación. En este caso, la punta del micropilote empujado será simplemente apoyada sobre roca y su capacidad resistente estará directamente relacionada con su tope estructural.

4.1. Mejora del terreno por desplazamiento

En cuestión de horas o días, los suelos desplazados radialmente durante la hinca o remoldeados debido al uso de ensanches puntuales (collar de fricción) se relajarán y comenzarán a presionar al micropilote. Esta presión genera una componente friccional que se suma a la capacidad resistente por punta, medida previamente durante la fase de hinca. A pesar de que esta componente friccional puede ser significativa, suele ser despreciada en la determinación del factor de seguridad a hundimiento. Los motivos son la dificultad de su cuantificación y su alta variabilidad entre los distintos tipos de suelo (Olson, 2014). Este efecto puede resultar ventajoso cuando el estrato resistente se encuentra a gran profundidad, debido a que el micropilote podría desarrollar la capacidad requerida por fuste en una profundidad más somera.

En las siguientes líneas se tratará de realizar una estimación de la mejora producida en la resistencia por fuste de los micropilotes empujados frente a los micropilotes convencionales (perforados e inyectados). Dado que el procedimiento de construcción de los micropilotes empujados es relativamente similar al de los pilotes hincados, para cumplir con el propósito anterior se hará uso de los siguientes manuales:

1. Guía de Cimentaciones de Obras de Carretera. GCOC. (DGC, 2009).
2. Código Técnico de la Edificación. CTE. (Ministerio de Vivienda, 2006).
3. Design Manual 7-02 Foundations & Earth Structures. (NAVFAC, 1986).

En estos manuales se habla de hinca dinámica de pilotes. En suelos granulares (especialmente en aquellos de baja densidad relativa) la hinca dinámica produce una mejora de compactación por vibración en el terreno, aunque

es de menor entidad que la obtenida por desplazamiento. Debe recordarse que en micropilotes empujados el proceso de hinca es estático, por lo que la ausencia de mejora de compactación por vibración podría disminuir la estimación realizada. En suelos cohesivos es indiferente usar hinca dinámica o estática, obteniéndose valores idénticos a largo plazo.

Las mejoras por desplazamiento obtenidas en fuste, sólo podrán ser consideradas si no se usa un ensanche puntual (collar de fricción) en el micropilote. Debido a que el uso de esta mejora, para facilitar la hinca del micropilote, altera su mecanismo de resistencia por fuste.

Según la normativa empleada, la mejora de resistencia de los pilotes hincados de acero frente a los pilotes perforados de hormigón se muestra en la siguiente tabla:

Se observa que las principales mejoras de resistencia conseguidas por los pilotes hincados de acero respecto a los perforados de hormigón se producen en suelos granulares. La hinca aumenta la resistencia en punta 2 veces y podrían conseguirse valores del mismo orden en fuste si se emplease una puntaza cónica (dependiendo del ángulo de rozamiento interno del terreno).

En suelos cohesivos, sólo se produce una mejora en punta en el largo plazo. En fuste, a pesar del beneficioso efecto de desplazar el terreno, hay disminución de resistencia.

Atendiendo a lo anterior, es evidente que el desplazamiento del terreno al hincar un pilote provoca una mejora inmediata en la densidad relativa de los suelos granulares. Por este motivo, resulta sensato asumir en los micropilotes empujados los mismos grados de mejora que en pilotes hincados de acero. En suelos cohesivos bajo nivel freático y para un estudio a corto plazo, el desplazamiento anterior incrementaría la presión intersticial provocando una reducción en las presiones efectivas o capacidad resistente del suelo. Aunque a largo plazo, tras la disipación de estas sobrepresiones, es obvio que sí se tendría una mejora por desplazamiento en punta y fuste. Debe ser indicado que la mejora en fuste se encuentra limitada por la baja rugosidad de la superficie lisa del acero. Esto pone de manifiesto la necesidad de realizar tratamientos en la superficie de acero del micropilote empujado para incrementar su adherencia con el terreno.

NOTA: Los valores dados en la tabla 1 poseen únicamente carácter orientativo, debiéndose ser tomadas con cautela. Se recuerda que el procedimiento correcto para cuantificar la mejora en la resistencia por fuste es la realización de pruebas de carga.

4.2. Ecuación empírica

Según Meyerhof (1956, 1976), la resistencia última por punta del terreno para pilotes hincados puede ser relacionada directamente con el número de golpes medido en el ensayo SPT de la siguiente forma:

$$P_{ptu} = 40 \cdot A \cdot N \cdot L/D$$

donde:

P_{ptu} : Resistencia última por punta del terreno (kN).

N: Valor del ensayo SPT en el nivel de la punta del micropilote. L: Longitud de penetración del micropilote (m). D: Diámetro del micropilote (m).

Meyerhof especificó que su ecuación empírica es válida siempre y cuando se verifique el siguiente criterio:

$$L/D \leq 10$$

Perko (2002) estableció que el área de la punta del micropilote empujado a introducir en la ecuación de Meyerhof debería ser la misma que si ésta fuese cerrada. Además, en caso de usar el collar de fricción, es necesario considerar el diámetro adicional proporcionado por éste. Este autor también recomendaba que el valor del SPT introducido en la ecuación de Meyerhof se corresponda al valor medio del tramo que comprende desde 3 diámetros bajo la punta del micropilote y 8 diámetros sobre ella. Dado que la ecuación de Meyerhof es para el cálculo de la capacidad en punta, la longitud de penetración (L) es indicativa de la presión efectiva vertical que gobierna el término N_q de la ecuación tradicional de capacidad portante. Por consiguiente, es razonable usar una fracción de la profundidad del micropilote.

Perko (2002) supone que la longitud de penetración (L) es igual al 25% de la profundidad del pilote menos 45

Tabla 1. Mejora de la resistencia en punta y fuste por desplazamiento del terreno al emplear pilotes hincados de acero frente a pilotes perforados de hormigón

Normativa	S. Granulares		S. Cohesivos (Corto Plazo)		S. Cohesivos (Largo plazo)	
	Punta	Fuste	Punta	Fuste	Punta	Fuste
GCOG	2,0	0,9	1,0	0,6	2,0	0,6
CTE (1)	1,2	1,0	1,0	0,8	1,2	1,1
CTE (2)	2,0	0,8	1,0	0,8	2,0	0,8
NAVFAC (1)	2,0	1,1-1,8*	1,0	**	1,0	**
NAVFAC (2)	2,0	1,6-2,6*	1,0	**	1,0	**

CTE (1): Resultados obtenidos mediante fórmulas analíticas.

CTE (2): Resultados obtenidos mediante fórmulas empíricas.

NAVFAC (1): Resultados obtenidos sin emplear puntaza cónica en el pilote hincado.

NAVFAC (2): Resultados obtenidos al emplear una puntaza cónica en el pilote hincado.

* El motivo de incluir un rango de mejora en el manual NAVFAC es que, en suelos granulares, la resistencia por fuste es inversamente proporcional al ángulo de rozamiento interno del terreno (el valor menor se obtiene para un ángulo de 40° y el mayor para un ángulo de 26°).

** No se ha podido cuantificar numéricamente la mejora.

centímetros, para considerar así la capa de suelo alterado en la superficie del terreno. Por tanto, L será dada por:

$$L = 0,25 \cdot (L_T - 0,45)$$

donde L_T = Longitud total del pilote (m)

Perko (2002) determinó que introduciendo en la ecuación de Meyerhof la definición de longitud de penetración anterior, los resultados obtenidos se ajustaban muy bien a las medidas realizadas en campo.

Desde el año 2002 Kolm y Perko (2017) han reunido y analizado más de 1500 ensayos de prueba de carga realizados en campo sobre micropilotes empujados. A partir del ajuste de estos datos y modificando la ecuación de Meyerhof expuesta con anterioridad, los autores proponen la siguiente fórmula empírica para estimar, de forma aproximada, la carga de hundimiento del terreno:

$$P = \pi \cdot D \cdot N \cdot (B_1 \cdot L + B_2)$$

donde:

P: Resistencia última por punta del terreno (N).

D: Diámetro del micropilote (m).

N: Valor del ensayo SPT en el nivel de la punta del micropilote.

L: Longitud de penetración del micropilote (m).

B_1, B_2 : Constantes que dependen del tipo del terreno según tabla.

Tabla 2. Constantes B_1 y B_2 . Adaptadas a sistema métrico desde Kolm y Perko, 2017

	B_1	B_2	R^2
Todos los suelos	1.388	15.542	0,12
SP	1.292	19.278	0,10
SM	1.675	6.786	0,45
ML	2.441	5.487	0,25
CL	1197	19526	0,08
Roca	1101	12711	0,14

Se observa que el valor R^2 indicativo de la bondad del ajuste lineal de los datos es muy bajo, en parte debido al alto grado de dispersión de los datos empleados. Parte de esta dispersión se debe a la variación de las características geotécnicas del terreno, la ejecución por diferentes empresas instaladoras y el uso de diferentes métodos de ensayo.

5. CONCLUSIONES

En base a la distinta bibliografía consultada, las ventajas que reporta la realización de un recalce con este tipo de micropilotes son las siguientes:

- Capacidad de acceso a espacios reducidos, tanto en anchura como en gálibo, dadas las pequeñas dimensiones de los medios auxiliares y maquinaria necesaria.

- No requieren perforación del terreno. Aunque en muchas ocasiones, la cimentación existente deberá ser perforada por rotación (con diamante) con equipos independientes.
- No necesidad de inyección posterior y extracción de terreno, permitiendo una reducción los equipos humanos y materiales junto con la ausencia de residuos. Este punto será especialmente importante en presencia de terrenos contaminados.
- Se usa el peso propio de la estructura a recalzar como reacción para hincar los micropilotes, evitando la necesidad de recurrir a maquinaria o lastres de mayores dimensiones.
- Los sistemas hidráulicos empleados pueden ser alimentados con electricidad. Por tanto, el espacio de trabajo estará libre de humos, minimizándose además ruidos y vibraciones.
- Gran fiabilidad. El proceso de ejecución constituye en sí mismo una prueba de carga, obteniéndose un registro continuo del comportamiento del terreno atravesado. Esto se consigue mediante el manómetro del cilindro hidráulico, que marca la presión del aceite dentro del pistón y que se corresponde con una fuerza de empuje en función del área efectiva del mismo. El contar con esta información permitirá reducir los factores de seguridad a adoptar y disminuir los riesgos asociados a un reconocimiento geotécnico incompleto o deficiente. Además, la capacidad resistente de todos los elementos del sistema (micropilote, grapa de conexión, estructura...) es verificable durante la hinca.
- Aumento de la carga de hundimiento debido al propio proceso de ejecución, al mejorar el terreno circundante por desplazamiento. Este efecto proporciona una resistencia de fricción por fuste adicional a la capacidad del micropilote perforado, que puede resultar significativa.

A pesar de sus ventajas, los micropilotes empujados presentan las siguientes limitaciones:

- Su reducido diámetro (del orden de 100 mm) facilita su hinca en el terreno, aunque al mismo tiempo limita su tope estructural. Por ello, esta técnica sólo será apta en recalces donde las cargas de servicio transmitidas por la estructura no superen las 25 toneladas por micropilote.
- Deberán ser instalados verticalmente y lo más cerca posible del eje central de las cargas transmitidas por la estructura para evitar la aparición de momentos excéntricos que introducirán sobreesfuerzos, tanto en la estructura como en el micropilote.
- Su uso no está recomendado en terrenos con presencia de gravas y bolos.
- En cimentaciones deterioradas o formadas por elementos de mampostería se desaconseja su utilización. Sin embargo, la inclusión de elementos de refuerzo en las mismas podría hacer viable la actuación de recalce en estas condiciones.

6. AGRADECIMIENTOS

A Howard Perko (Director de Ingeniería de MAGNUM PIERING INC, USA), Jeff Kortan (Director de Ingeniería de SUPPORTWORKS INC, USA), Juan José Rosas (Director Técnico de 2PE PILOTES SL, España) y a Federico Beccherle (Director Técnico de GEONOVATEK SL, España) por su consentimiento para publicar en este artículo información técnica y fotografías de sus empresas.

7. BIBLIOGRAFÍA

2PE PILOTES SL (2014). *Innovando en Cimentaciones* [online]. Disponible en <http://www.2pe.biz/es/innovando-en-cimentaciones>

2PE PILOTES SL (2015). *Cimentaciones Suspendidas sobre Apoyos Profundos, Tecnología CSAP* [online]. Disponible en <http://www.2pe.biz/es/cimentaciones-suspendidas-sobre-apoyos-profundos-tecnologia-csap>

American Society for Testing and Materials (1994). Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load, Test Designation D1143. ASTM.

American Society of Civil Engineers (ASCE) (1997). *Standard Guidelines for the Design and Installation of Pile Foundations*. Publication 20-96. Virginia (EE UU).

Breuchaud, J. (1896). Construction of supports for building walls, &c [archivo PDF]. United States of America, 570.370, October 27, 1896. App. 597.633, June 30, 1896. Disponible en <http://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US570370.pdf>

Dirección General de Carreteras (DGC) (2005). *Guía para el Proyecto y la Ejecución de Micropilotes en Obras de Carretera*. Madrid: Ministerio de Fomento.

Dirección General de Carreteras (DGC) (2009). *Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera*. Madrid: Ministerio de Fomento.

GEONOVATEK (2016). Catálogo General [archivo PDF]. Disponible en <http://www.geonovatek.es/symphony/workspace/uploads/users/REVbrochure2016-WEB.pdf>

GEONOVATEK (2016). Catálogo LIFT-PILE® [archivo PDF]. Disponible en <http://www.geonovatek.es/symphony/workspace/uploads/users/DESCARGA/GeoNovatek-Catalogo-LiftPile.pdf>

Kolm, M.J., y Perko, H.A. (2017). Capacity of Hydraulically Jacked Piles. *DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute* (pendiente de publicación). New Jersey (EE UU).

Magnum Piering Inc., (2004). *Magnum Steel Push Pier™. Technical Reference Guide* [archivo PDF], pp. 1-111. Disponible en http://www.magnumpiering.com/shared/content/pdfs/Magnum_Steel_Push_Piering_Manual_-_5-10-04_web.pdf

Meyerhof, G.G. (1956). Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*. 82(1): pp. 1-19.

Meyerhof, G.G. (1976). Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*. 102(3): pp. 195-228.

Ministerio de Vivienda (2006). *Código Técnico de la Edificación (CTE)*. Madrid: Ministerio de Vivienda

Naval Facilities Engineering Command (NAVFAC) (1986). *DM-7.2 Foundations and Earth Structures*. Washington, DC, (EE UU): NAVFAC.

Olson, K. (2014). *An Introduction to Retrofit Push Piers* [archivo PDF]. Foundation Supportworks Inc. Disponible en <http://d6449bb3dc657045bfc9-290115cc0d6de62a29c33db202ae565c.r80.cf1.rackcdn.com/319/AnIntroToRetrofitPushPiers.pdf>

Paikowsky, S.G., y Whitman, R.V. (1990). The Effects of Plugging on Pile Performance and Design. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(4): pp. 429-440.

Perko, H. A. (2002). *Axial Capacity of Hydraulically-Jacked, Steel-Pipe Micropiles Used for Underpinning*. Magnum Piering Inc., pp. 1-7.

Revesz, G.H. et al. (1961). *Method and apparatus for underpinning a building* [archivo PDF]. United States of America, 2.982.103, May 2, 1961. App. 786.212, January 21, 1959. Disponible en <http://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US2982103.pdf>

SUPPORTWORKS INC., (2017). *FSI Technical Manual*, Third Edition [archivo PDF], pp. 205-228. Disponible en <http://commercial-foundationsupportworks.com/technical-information/technical-manual.html>

White, L. (1917). *Method of providing substructures for structures* [archivo PDF]. United States of America, 1.217.128, February 20, 1917. App. 83.210, March 10, 1916. Disponible en <http://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US1217128.pdf>

White, L. (1931). *Method of providing substructures for structures* [archivo PDF]. United States of America, 1.827.921, October 20, 1931. App. 359.591, May 1, 1929. Disponible en <http://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US1827921.pdf>