

UN NUEVO SISTEMA DE CIMENTACION: EL ZAPILOTE

Por MANUEL VIDAL HEREDERO
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Con motivo de la realización de dos obras de cimentación en Madrid (una de ellas en el paseo de Recoletos y otra en Castellana, esquina a Eduardo Dato), se ha puesto a punto, contando con la maquinaria adecuada, un nuevo sistema que combina las ventajas de dos de los medios normales de cimentación: zapatas y pilotes. Este nuevo tipo, cuya descripción y principio de cálculo constituyen el presente artículo, se ha denominado Zapilote.

Consideraciones previas.

Antes de entrar en la descripción del zapilote y para comprender mejor las diferencias que tiene con los sistemas actuales normales de cimentación, vamos a pasar revista rápidamente a dos de ellos, de cuyas propiedades y características participa de algún modo el zapilote: zapatas normales de cimentación y pilotaje.

La zapata de cimentación, aislada o corrida, tiene un principio y razón de ser muy sencillos: a una profundidad generalmente pequeña, aumentar la superficie de reparto de las cargas de los pilares, hasta lograr que la tensión unitaria en el terreno se mantenga inferior a la carga admisible del mismo. Suponemos que este término "carga admisible" tiene en cuenta ya los dos aspectos fundamentales que la definen como tal: la capacidad de carga del terreno para unas dimensiones de carga y profundidad de cimentación determinadas y de forma que los asentamientos que se produzcan con ella sean aceptables para la estabilidad de la estructura. Esta doble condición ha de tenerse en cuenta siempre que se habla de "carga admisible" en el terreno.

El pilote, en sus diversos tipos, tiene por objeto el transmitir a capas profundas las cargas que le proporciona la estructura, salvando estratos superiores de mala calidad, desde el punto de vista geotécnico, incapaces de absorber aquéllas. La transmisión de las cargas del pilote al terreno tiene lugar de dos formas, según el tipo de pilote y, sobre todo, teniendo en cuenta la naturaleza y características del terreno.

Salvando los casos extremos, en que toda la carga se transmite de una sola forma primordial, podemos decir que parte de la carga se transmite al terreno por la punta, y parte por rozamiento por el fuste.

Se comprende fácilmente que desde el caso en que el pilote se apoya en roca (carga por punta) hasta el caso de un pilotaje flotante en arcilla poco consistente, existen todas las combinaciones intermedias.

Si, de acuerdo con el croquis adjunto y suponiendo un pilote circular, llamamos r al radio del mismo, la carga crítica puede ser expresada así:

$$R = R_p = 2 \pi r \cdot h \cdot f, \quad [1]$$

en la que R_p representa la carga crítica en la base circular del pilote y f la fricción entre el pilote y el terreno, valor generalmente difícil de determinar y que suele estimarse a base de datos obtenidos de observaciones en el terreno. Como ejemplo, anotamos unos valores medios dados por Terzaghi:

	f	kg./cm. ²
Limo y arcilla blanda	0,075	0,30
Arcilla muy compacta	0,500	1,00
Arena suelta	0,125	0,35
Arena densa	0,350	0,70

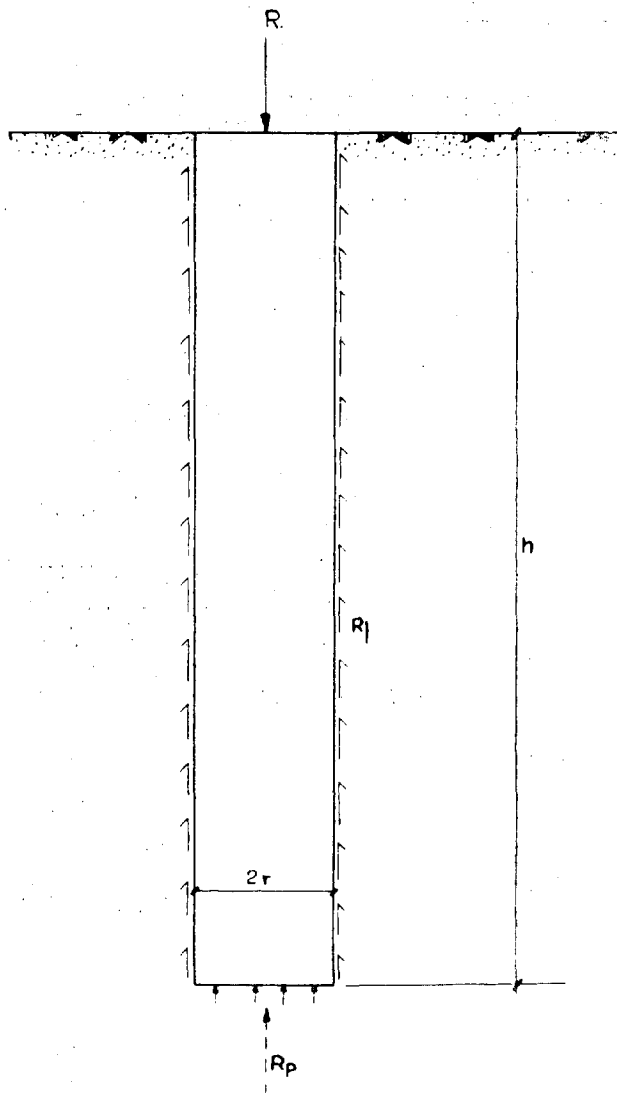
La carga crítica R_p de la base del pilote se puede determinar mediante las fórmulas de Terzaghi:

$$R_p = \pi r^2 (1,3 \cdot c \cdot N_c + \gamma \cdot h \cdot N_q + 0,6 \cdot \gamma \cdot r \cdot N_\phi),$$

siendo los valores N los coeficientes de capacidad de carga, números sin dimensión, dependiendo sólo de ϕ .

Como se puede ver, el término R_p corresponde a la resistencia de punta, mientras que la cantidad $2 \pi r h f$ es la resistencia por fuste.

Y en este punto, cuando nos vemos obligados a aumentar la capacidad de carga de los pilotes, necesarios al no encontrar a profundidad razonable y "económica" un terreno que permita la cimentación por zapatas, nace el zapilote.



$$R = R_p + R_f$$

De acuerdo con la fórmula [1], y para un terreno dado, hay dos formas de aumentar la capacidad de carga de los pilotes, que en el fondo son la misma cosa. Una es aumentar el radio del pilote, con lo que aumenta la carga de punta y la de fuste, y otra es el ensanchar la base hasta lograr que aumente grandemente la carga de punta.

El zapilote podemos entonces definirlo como un pilote excavado *in situ* y ensanchado en su base incluso hasta tres veces su diámetro, y que según la relación: profundidad-diámetro de la base se comportará como un pilote o una zapata en relación con el terreno en el que se apoya y al que transmite su carga.

Hipótesis y fórmulas de cálculo de los zapilotes.

De la definición hecha en el párrafo anterior, se ve que prácticamente el zapilote, con ensanchamientos de la base de hasta tres metros de diámetro, en la mayoría de los casos se comportará como una zapata, pues para poder considerarlo como pilote real debería tener al menos una profundidad de cuatro a cinco veces el diámetro, es decir, unos 15 metros.

Además, prácticamente toda la carga que actúa sobre un zapilote será con el tiempo soportada solamente por su base, por lo que, en general, y de una forma conservadora, es aconsejable el no tener en cuenta el rozamiento, o bien considerar que el peso propio es absorbido por fricción y que la carga que incide sobre el zapilote se transmite directamente a la base ensanchada del mismo.

Estas consideraciones han sido las que se han tenido en cuenta al hacer el estudio de la cimentación de las dos obras de referencia en Madrid.

Allí, y basados en las consideraciones hechas hasta ahora, se ha tomado como carga admisible en un zapilote la siguiente:

$$R = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \sigma_p + 2\pi r h \cdot f,$$

siendo como hasta ahora:

r = el radio del fuste del zapilote.

h = su longitud.

f = el rozamiento entre hormigón y terreno.

D = el diámetro de la base ensanchada.

σ_p = la tensión admisible en punta.

En esta fórmula se ha descontado el peso propio del zapilote por metro lineal, llegando a un rozamiento ficticio algo menor del real considerado.

Método de construcción.

Como puede deducirse de lo tratado hasta el momento, el zapilote es un elemento estructural lógico, desarrollado a partir de una necesidad, la de aumentar la capacidad de carga de un pilote normal.

En efecto, expresándonos de una forma deliberadamente incorrecta, podemos decir que la zapata de cimentación, a una profundidad fija, generalmente pequeña, aumenta su superficie hasta conseguir que la carga unitaria sea infe-



Foto 1. — Equipo trabajando en Madrid.

Foto 3. — Introducción del tubo para cortar las filtraciones.

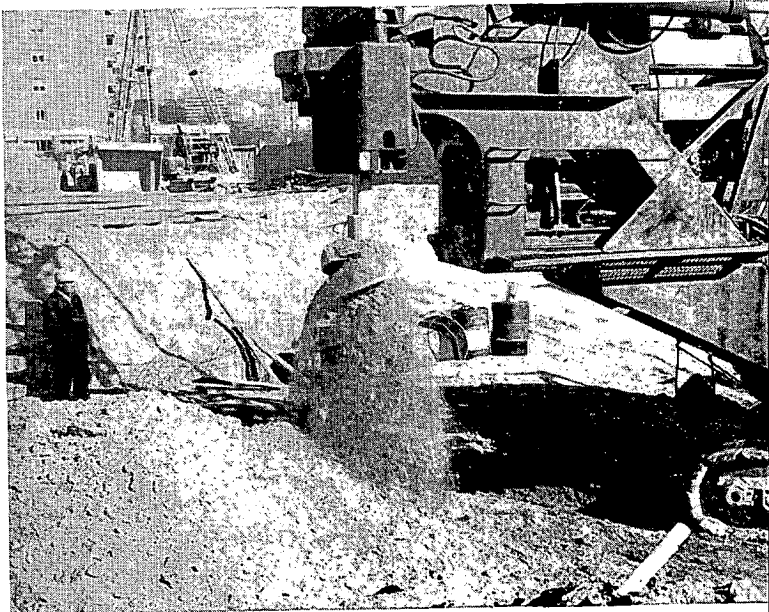


Foto 2. — Comienza la perforación. Las tierras son extraídas con la propia hélice.

rior a la "admisible" del terreno a esa profundidad .

De análoga forma, el pilote lo que hace es transmitir una carga determinada, a la profundidad necesaria, para que el terreno pueda absorberla.

Foto 4. — Descarga de las tierras mediante giro de la hélice de perforación.



La zapata tiene así un crecimiento horizontal y el pilote un crecimiento vertical. El zapilote, creciendo inicialmente en profundidad, al llegar a un estrato apto para sus propósitos, se extiende en horizontal hasta ser aceptado por su compañero de trabajo: el terreno, al que transmitirá la carga que éste puede resistir.

Vistas así las cosas, se comprende que la única dificultad reside en la construcción a profundidad apreciable del ensanchamiento necesario en el zapilote para la estabilidad de la cimentación.

Volviendo atrás en nuestra exposición, podemos decir que esta dificultad aparece cuando es necesario cimentar a una cota apreciable bajo el nivel del suelo, mediante zapatas. La penosa imagen de la excavación de pozos entibados, lenta y llena de peligros, sin hablar ya de los agotamientos precisos cuando se trabaja bajo el nivel freático, es un ejemplo claro suficientemente conocido y sufrido por los técnicos relacionados con la construcción, que se han visto obligados a realizarla en alguna ocasión, como para que necesitemos recalcarla.

En otras ocasiones se ha recurrido a ensanchamientos en la base de los pilotes, creando bulbos de hormigón mediante golpeo de una maza, ensanchamientos por otra parte difícilmente conocidos *a priori* y de difícil comprobación como, por ejemplo, sucede en algunos tipos de pilote de los llamados apisonados.

La posibilidad de proyectar adecuadamente el ensanchamiento preciso en el zapilote, en función de las características del terreno, es otra ventaja no despreciable de este sistema de cimentación para el Ingeniero.

Queda solamente, como decíamos, el pro-

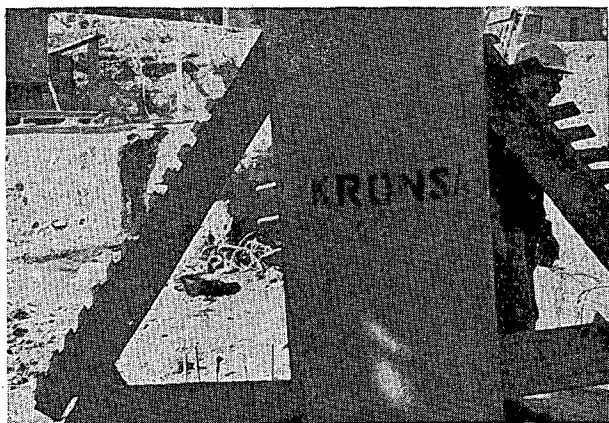


Foto 5. — Ensanchador con los brazos extendidos.

blema de la ejecución del ensanchamiento en la base del zapilote.

Esta operación se realiza sustituyendo la hélice o la cuchara que ha servido para realizar la perforación a rotación, por un ensanchador, que puede verse en la foto 5 provisto de unos brazos extensibles con unos dientes convenientemente dispuestos, que se baja al fondo del taladro con los brazos recogidos y allí se extienden progresivamente a medida que avanza el ensanchamiento, hasta lograr el diámetro proyectado.

Los productos de excavación se extraen con el propio ensanchador, en el interior del mismo.

Características del ensanchamiento.

Actualmente se pueden realizar taladros de 0,85, 1 y 1,15 metros hasta profundidades próximas a los 30 metros. Los ensanchamientos máximos son de 2,70 veces el diámetro del fuste, por lo que para el zapilote de 1,15 podemos llegar a diámetros en la base de tres metros.

Para comprender de una forma gráfica lo que esto significa, supongamos que el terreno puede trabajar a 6 Kg./cm.², normal, por ejemplo, en el "tosco" madrileño a cierta profundidad. En este caso el zapilote en punta podría resistir, con el ensanchamiento de tres metros en la base, unas 420 toneladas. Ordenes de magnitud de cargas en pilotes normales *in situ* o hincados con bulbo en la base, en diámetros próximos a 600 mm., son las 80 a 120 toneladas.

Otra de las características que hacen interesante el empleo del zapilote como sistema de cimentación es que existe siempre la posibilidad de visitar el ensanchamiento descendiendo por el interior del taladro hasta llegar a la base del mismo, pues debido a la forma circular del pozo, el terreno adquiere una gran estabilidad y además si es necesario se puede entubar perfectamente. Esto permite, de una parte, el comprobar el estado final del mismo antes del hormigonado, así como el introducir la posible armadura o emparrillado inferior de la base, cosa, por otra parte, no muy necesaria, pues el talud suave que toma el ensanchamiento, con una altura de unos dos metros, permite una transmisión progresiva de esfuerzos de compresión sin que prácticamente se produzcan flexiones en ménsulas invertidas normales en zapatas.

En cuanto a la posibilidad de ejecución material del mismo, basta con que el terreno tenga una ligera cohesión para que sea posible el

realizarlo, por lo que en la mayoría de los terrenos, salvo que se trate de arenas limpias, es posible su ejecución.

Aplicaciones del zapilote como medio de cimentación. Pantallas.

De las características enumeradas hasta el momento, se deduce que el zapilote es un medio muy interesante de cimentación, cuyo empleo está indicado cuando no es posible la construcción de zapatas por no ser adecuado el terreno en superficie y no resulta rentable la excavación de pozos, por ejemplo, por la existencia de un nivel freático superficial.

A este respecto hay que hacer notar que en las dos obras de referencia inicial realizadas en Madrid, existía el problema de los niveles colgados de agua en espesores de hasta cinco y seis metros. La entubación del taladro dejando una camisa perdida antes de llegar al "tosco" impermeable permitió el dejar en seco aquél antes de realizar el ensanchamiento, que se realizó sin novedad, siendo inspeccionado en varios casos antes de la introducción de las armaduras y el hormigonado.

En la información fotográfica que se incluye se pueden ver diversas etapas de la ejecución del zapilote, perforación, extracción de terreno con la propia hélice (o eventualmente cuchara), entubado, etcétera.

En cuanto a costos y rendimientos de este sistema, podemos decir que, en el primer aspecto, el zapilote entra en competición con el pilotaje, considerando el costo de la tonelada resistida, sobre todo cuando las cargas transmitidas al terreno son importantes.

De este modo, con muchas menos unidades que en una obra de pilotaje normal y con rapidez de ejecución notable, es posible disminuir los plazos totales de la obra con las siguientes ventajas.

Hemos dejado para el final

una aplicación interesante del zapilote, y en su empleo en pantallas de contención previas a la excavación. Combinado con pilotes normales sin ensanchar en la base, realizados con el mismo sistema de rotación (hélice o cuchara) permite realizar una doble función: de una parte, el servir de contención a las tierras y como un pilote normal en pantalla. De otra parte, colocado bajo los pilares perimetrales, absorber las cargas verticales que aquéllos transmiten.

La posibilidad de simultanear la construcción de la pantalla y los zapilotes interiores, hace posible que con arriostramientos de aquélla con el forjado y vigas definitivas de la estructura se puedan realizar excavaciones importantes.

En una de las obras mencionadas se ha realizado de este modo una excavación libre de unos cuatro metros, y en la otra, aún mayor, unos seis metros. Los pilotes en pantalla eran de 0,85 metros de diámetro, en la primera, y de 1,15, en la segunda, armados convenientemente para resistir los empujes de tierras, que se calcularon a partir de datos previos obtenidos con sondeos y pruebas de laboratorio.

En la actualidad se están haciendo estudios para, con sucesivos arriostramientos, efectuar

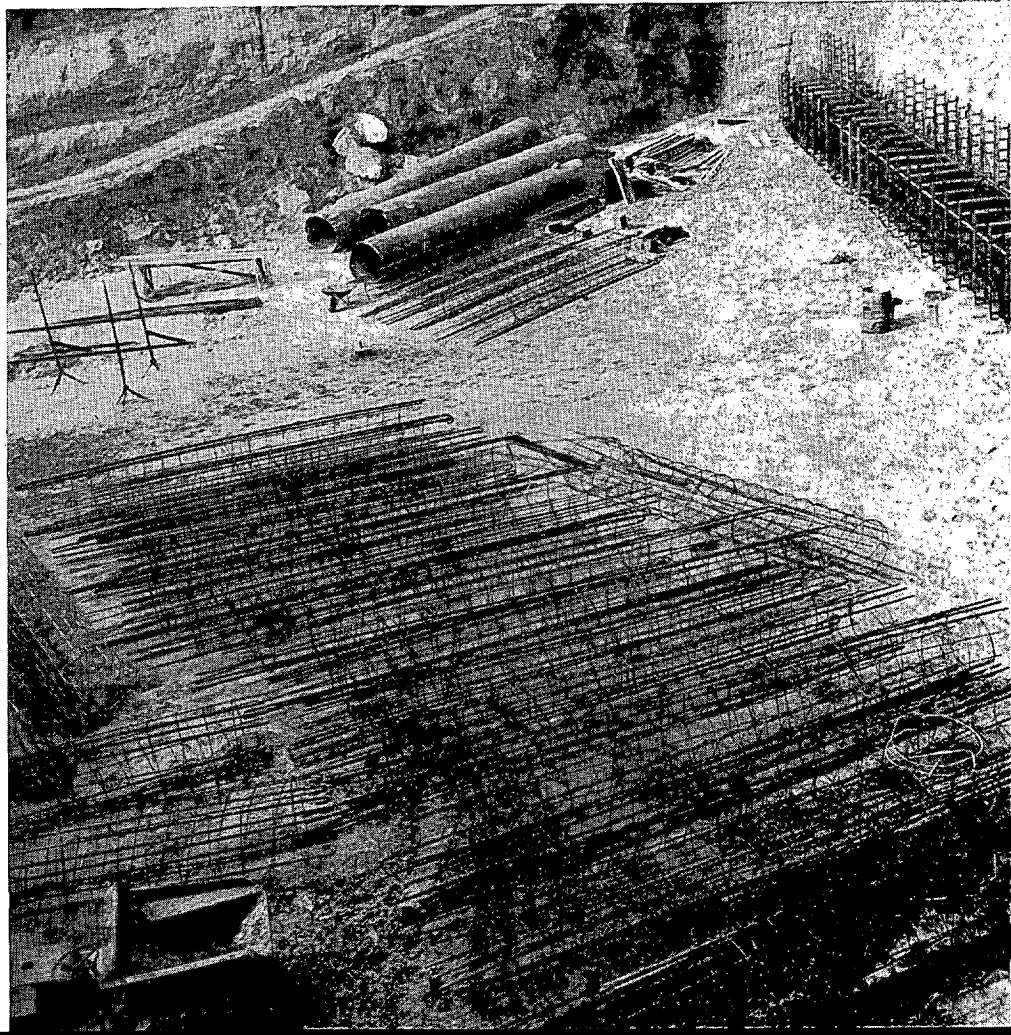


Foto 6. — Armaduras y camisas de chapa preparadas para ser introducidas en el zapilote.

excavaciones de unos 20 metros de profundidad, para la construcción de siete sótanos.

Como dato curioso, y a la vista del número de casos presentados, actualmente se está preparando la programación del método de cálculo de estas pantallas de pilotes.

Hay que hacer notar que realizado en cada caso un estudio concreto del estado y naturaleza de las cimentaciones de los edificios vecinos, se pueden construir las pantallas prácticamente pegadas a las medianerías, y en este caso se calculan aquéllas para absorber este empuje adicional de los edificios adyacentes.

El hecho de poder realizar un muro pantalla por puntos, perforando sin producir golpes ni vibraciones y entubando si se considera necesario, conduce a una solución que nos parece la más segura para este tipo de trabajos.

Además, puesto que se trabaja en seco, sin empleo de lodos en la perforación, no existe el peligro, normal, por ejemplo, en terrenos como el de Madrid, de variar las características del terreno, sobre todo en cuanto a cohesión se refiere, puesto que se mantiene la humedad natural del suelo. Asimismo, se elimina el peligro de fugas de lodos con los desprendimientos consiguientes.

Otro aspecto interesante del sistema consiste en la ejecución de muros pantalla, mediante pilotes aislados.

Las instrucciones danesas admiten que cuando la separación entre ejes de pilotes es menor de cuatro diámetros, el pilotaje funciona como pantalla continua. Con posterioridad, los ensayos en el Politécnico de Hannover han reducido esta separación a dos diámetros.

En todo caso, cuando el terreno y la estructura lo permiten, resulta una indudable economía, al disminuir considerablemente la medición. Combinando diámetros, armado y separaciones entre pilotes se puede llegar a la solución más indicada en cada caso, con rapidez y seguridad.

Grupos de zapilotes

Cuando las cargas a resistir son muy elevadas, se pueden disponer grupos de zapilotes, sobre los cuales una zapata o encápado recibe y reparte la carga de los pilares, de forma análoga a como se hace en pilotes normales.

La única precaución necesaria a tomar consiste en separar los zapilotes entre sí, de forma que los ensanchamientos de todos ellos sean posibles sin interferirse mutuamente.

Puesto que el ensanchamiento máximo es de unos tres diámetros del fuste, con esta misma distancia entre ejes de zapilotes se resuelve el problema.

Resumen y conclusión.

Un nuevo tipo de cimentación se ha desarrollado y puesto a punto, basado en ensanchar hasta tres veces el diámetro, la base de un pilote excavado *in situ* contando con la maquinaria apropiada, creando un tipo intermedio entre un pilote propiamente dicho y una zapata normal, por lo que se ha denominado a este sistema zapilote.

Este zapilote puede ser construido en cualquier terreno que reúna unas ciertas condiciones mínimas para poder realizar el ensanchamiento de la base, como, por ejemplo, que exista una ligera cohesión en aquél.

Con la maquinaria actual se puede llegar a profundidades de unos 30 metros con ensanchamientos máximos de tres metros en la base, lo que permite resistir cargas de hasta 400 toneladas por zapilote, siendo posible el disponer grupos de zapilotes bajo una zapata común si la carga supera estos valores.

Este sistema compite en precios con otros sistemas de cimentación, y la rapidez de ejecución supera en muchos casos a aquéllos, dependiendo de las condiciones particulares de cada caso concreto.

El método de perforación, a rotación con hélice o cuchara, sin producir ninguna clase de golpes o vibraciones que pudieran afectar a edificaciones cercanas, lo hacen especialmente apto, con o sin ensanchamiento en la base, para ejecutar pantallas con elementos tangentes o separados en función de las características del terreno y de la estructura y de los edificios colindantes. Con los arriostramientos necesarios, que pueden formar parte de la estructura definitiva, y el armado que resulta de los cálculos, es posible hacer excavaciones que pueden llegar a los 20 metros de profundidad.

Por la enorme seguridad que el zapilote proporciona, su coste en línea con otros sistemas y su rapidez de ejecución, así como por la posibilidad de adaptarse en cada caso, con los ensanchamientos precisos, a un proyecto determinado, es un medio de cimentación muy interesante desde el punto de vista técnico y económico y creemos que su desarrollo y extensión van a ser extraordinarios.