

Problemas de ejecución en pilotes perforados. Causas y soluciones. (1ª parte)

David Núñez Becerra, Director Técnico; Dekon, Técnicas de Cimentación, S.L.

Introducción

Se presenta a continuación, una sistematización de los defectos que se pueden producir durante las fases de ejecución de pilotes perforados, abarcando los tipos que se denominan, siguiendo los criterios de las Normas Tecnológicas de la Edificación (NTE, Ministerio de Fomento, 1.998): CPI-4 (pilote con entubación recuperable), CPI-5 (con entubación perdida), CPI-6 (con fluido de estabilización), CPI-7 (en seco) y CPI-8 (hormigonado a través de la barrena central).

El principal objetivo, es obtener un mayor entendimiento de los problemas que son habituales en este sector de las cimentaciones especiales. Abordando las causas y sus posibles soluciones, presentando criterios para evitar retrasos y posibles penalizaciones económicas en el transcurso de las obras.

Hay que resaltar, que como en tantos otros aspectos, se requiere de una visión global de todos los factores implicados (conocimiento profundo de la geología y comportamiento geotécnico del sustrato presente, potencia y características de la maquinaria utilizada, experiencia y habilidad del equipo que ejecuta, calidad del hormigón, bentonita, etc.), siendo la suma de todos los componentes en conjunto, más la experiencia del que observa todos los condicionantes, la base del éxito ante eventuales problemas de interpretación cuando aparecen defectos; ya que defectos aparentemente iguales, se producen por causas diferentes.

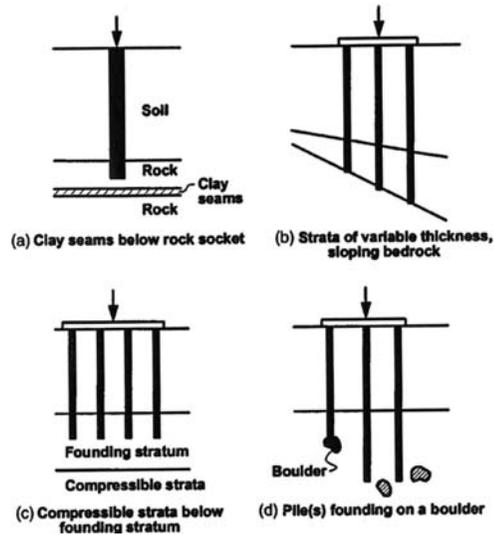
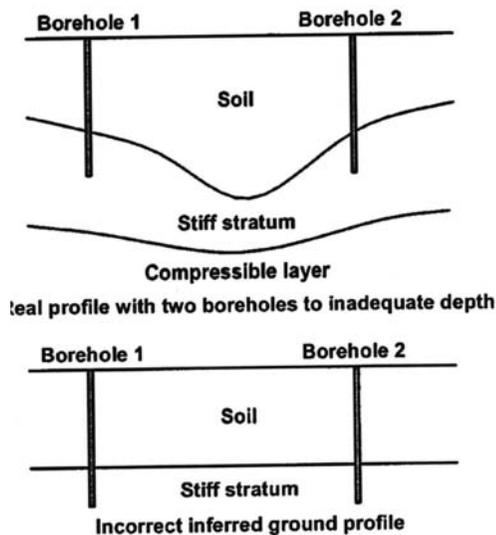
Causas de imperfecciones:

1. Campaña de reconocimiento geológico insuficiente. Condicionantes geológicos.

Dado que un pilote se utiliza como elemento de soporte, debido a las características geotécnicas insuficientes de un terreno, resulta bastante evidente disponer de una definición geológica adecuada del sustrato, tanto por lo que se refiere a la profundidad adoptada por los sondeos, como por la calidad y cantidad de los ensayos realizados. Este es un hecho importante por dos causas, la primera se refiere a los datos que utilizará el calculista para el diseño de la cimentación y la segunda y no menos importante, pero que generalmente no se tiene suficientemente presente, para que el contratista que hará la obra, escoja el sistema de ejecución más conveniente a la vista de los resultados obtenidos de la interpretación del modelo geológico.

Cada técnica constructiva se adapta mejor que otra a una serie de condicionantes y no es inusual lamentablemente, empezar la ejecución de la obra con un sistema que a los pocos días se observa como inadecuado o poco productivo, con las consecuencias que suponen tanto para el ejecutor como para la propiedad, causando tensiones y malos entendidos, a parte del prejuicio económico totalmente evitables y previsibles con la información adecuada antes del inicio de los trabajos.

Se parte de un modelo geológico erróneo, debido a una campaña de prospección insuficiente, por falta de un número adecuado



Figs. 1 y 2. Ejemplo de modelo mal interpretado por causa de investigación inadecuada y ejemplos de condicionantes geológicos durante la ejecución de pilotes. (Poulos, H.G., 2005).

de sondeos, profundidad corta alcanzada por estos y/o por disponer de pocos ensayos para caracterizar la continuidad lateral de los estratos presentes en el subsuelo, así como sus parámetros geotécnicos más relevantes.

En los casos b y d de la fig. 2, se encuentra un grupo de pilotes con diferentes longitudes de fuste. Dependerá de la parte que trabaje en punta o fuste, para conocer el grado de afección que se puede producir, como asentamientos diferenciales.

Se desarrollan a continuación, algunos condicionantes geológicos:

1.1. Intercalación arcillosa en material rocoso/ Estrato compresible por debajo de donde apoya la punta del pilote.

Se supone la presencia de un nivel arcilloso compresible, por debajo de la punta del pilote. Aunque durante la campaña de prospección siempre se debe profundizar varios diámetros por debajo de la cota del fondo del pilote, puede pasar que la intercalación no se haya detectado.

La presencia de la arcilla modifica el modelo de comportamiento en la punta del pilote significativamente, creando una vía preferente para la superficie de rotura, reduciendo en gran medida la capacidad de la cimentación, así como su rigidez.

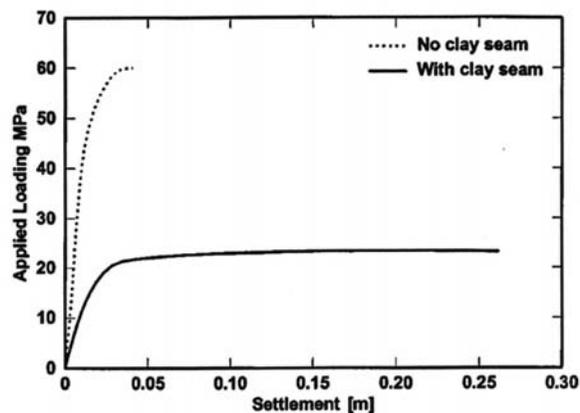


Fig. 3. Ejemplo del efecto que produce un nivel arcilloso, en el comportamiento carga-asiento en la base de un pilote. (Poulos, H.G., 2005).

El efecto final dependerá fundamentalmente de la potencia del nivel arcilloso, de su distancia a la base del pilote y de su compresibilidad. Por otro lado, la influencia de la intercalación arcillosa decrece, al aumentar la longitud del pilote, ya que existe una mayor contribución del fuste en la transmisión de la carga al terreno. Si la geología es tal que el pilote sólo trabaja por punta, la influencia será máxima. El hecho es especialmente crítico, si la arcilla se encuentra justo por debajo del pie del pilote, mermando más la rigidez de la base del pilote, que la capacidad de esta.

En el caso de un grupo de pilotes, la afección por la presencia de la veta arcillosa será mayor,

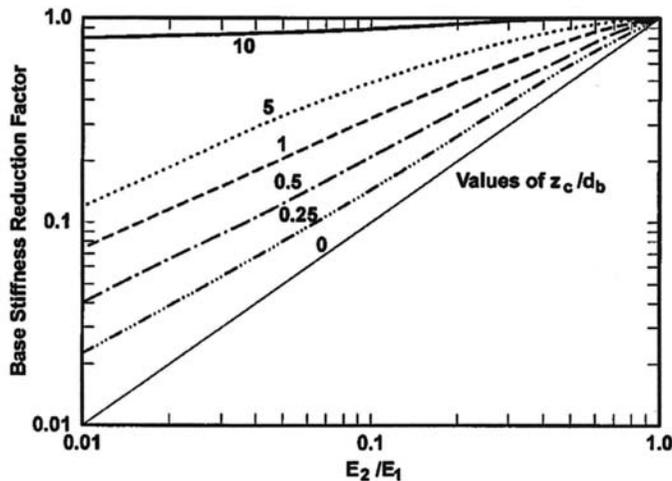


Fig. 4. Reducción en el factor de rigidez para la base de un pilote con estrato compresible subyacente. (Poulos, H.G., 2005).

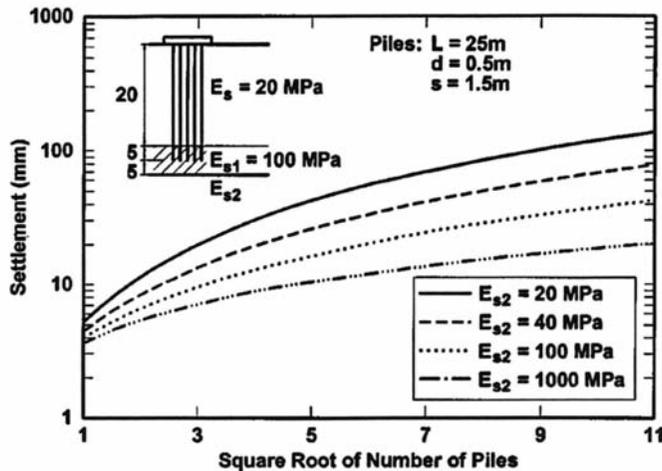


Fig. 5. Efecto del asiento producido, por presencia de estrato compresible en un grupo de pilotes con planta cuadrada y distancia interejes de 2 diámetros. (Poulos, H.G., 2005).

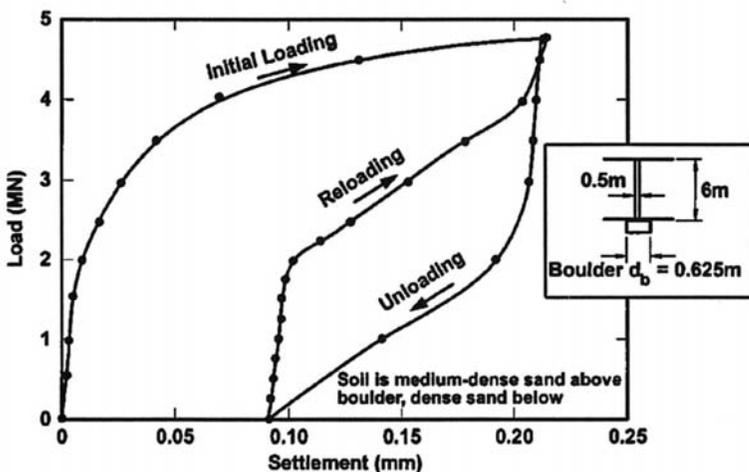


Fig. 6. Curva de carga-asentamiento de un pilote sobre bolo. (Poulos, H.G., 2005).

esto se debe a que el diámetro de la base del grupo es mayor que en un pilote individual y por tanto hay una mayor proporción de la carga transmitida al subsuelo que se realiza a través de la punta. Por tanto, al tener un diámetro equivalente mayor el grupo de pilotes, la reducción en la capacidad de la base será superior.

1.2. Pilote apoyado sobre bolo

Se encuentra en aquellos depósitos que tienen un origen coluvial o glacial, donde es usual la presencia de bloques y bolos. El efecto que se desencadenará en el pilote, es que de entrada tenderá a comportarse como si tuviera una base mayor; pero teniendo una capa compresible por debajo. Como se comprueba en la fig. 6, de entrada el comportamiento es incluso superior al esperado, debido a la presencia del bolo. En el momento que se realiza la descarga, el fondo del pilote se separa del bolo y se provoca un salto. Al volver a cargar el pilote en un ensayo de carga estática, el salto efectuado anteriormente, conduce a una reducción de la resistencia hasta que el pilote recontacta nuevamente con el bolo, (fig. 6).

Si esto ocurre en un pilote dentro de un grupo, este último experimentará un desplazamiento lateral y un asentamiento irregular.

El diámetro de la perforación, no será inferior al triple del tamaño del mayor bolo, para que la perforación sea económicamente rentable y no se traben ni bloqueen los bolos durante el proceso de ejecución.

2. Replanteo incorrecto

Se suele indicar el centro del pilote mediante una estaca o varilla. A partir de este punto, deben replantearse dos ejes ortogonales que se cortan en el centro del pilote y que tienen como longitud el diámetro de este. Tal replanteo puede realizarse fácilmente con dos operarios, situados en los extremos de una cinta métrica, marcando convenientemente en el suelo, (fig. 7).

A pesar de que la maquinaria actual, indica en la pantalla de la cabina del operador la verticalidad de la torre de la pilotadora, es conveniente al inicio de la excavación colocar un regle de nivelación en las paredes del útil de perforación.

Las tolerancias geométricas admitidas en la norma UNE-EN 1536 (AENOR, 2.000), son las que se indican a continuación:

- Situación en planta de pilotes verticales e inclinados, referida a la cota de trabajo:
 - 0,10 m para pilotes de $D \leq 1,0$ m.
 - $0,10 \times D$ para pilotes de $1,0 \text{ m} < D \leq 1,5$ m.
 - 0,15 m para pilotes de $D > 1,5$ m
- Desviación de pilotes verticales o inclinados hasta 4° :
 - $\leq 0,02$ m/m
- Desviación de pilotes inclinados entre 4° y 15° :
 - $\leq 0,04$ m/m
- Desviación en planta de ejes de ensanchamientos en relación con el eje del pilote:
 - $\leq 0,10 D$



Fig. 7. Ejemplo de replanteo en eje de pilote.

caso de existir), la colocación de la armadura o por falta de docilidad del hormigón.

Durante la ejecución del pilote y conforme se avanza en los diferentes estratos, se pueden encontrar niveles inestables y por debajo del nivel freático. En estas zonas es frecuente la aparición de sobre excavaciones, siendo especialmente necesaria la utilización de entubación provisional o perdida (según las necesidades), para ejecutar el pilote. La presencia de este revestimiento, permite mantener las cavidades en condiciones relativamente estables durante un corto intervalo de tiempo para poder finalizar el pilote

3. Sobre excavación

3.1. En presencia de agua

Se refiere al material extraído de la perforación, más allá del diámetro nominal de la periferia del pilote, que puede resultar en presencia de cavidades locales. Aunque se produce principalmente durante el proceso de perforación, también puede ocurrir durante la colocación del revestimiento provisional (en

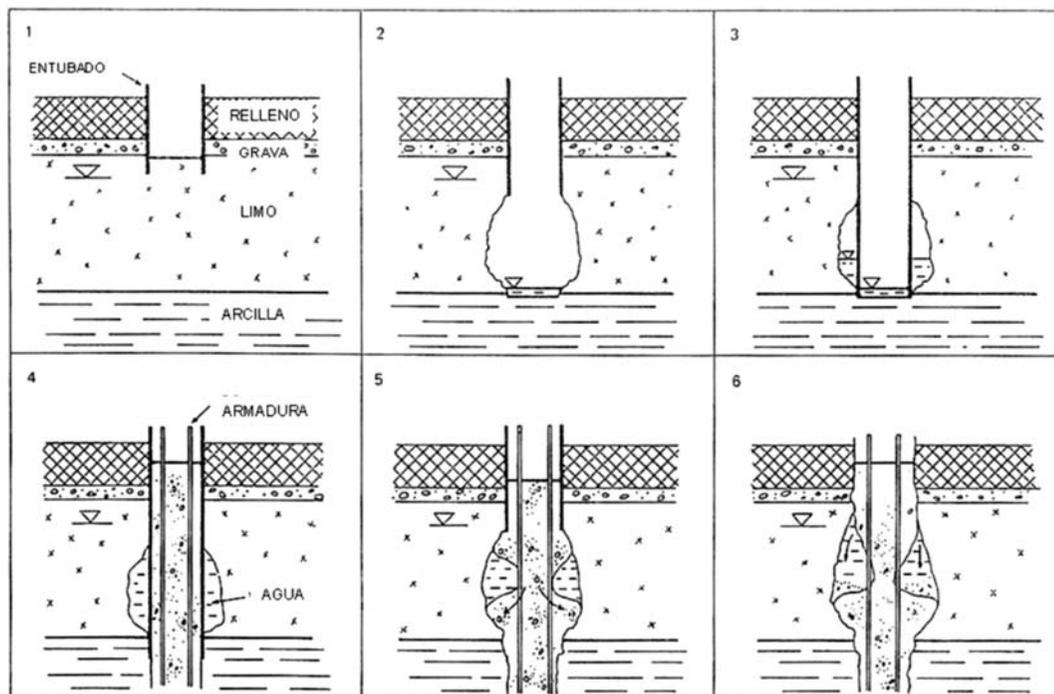


Fig.8. Formación y efecto de cavidades. (Thorburn, S., 1977).

y deberá presentar un empotramiento suficiente en estrato impermeable, para producir un correcto sellado del tramo revestido. La entubación provisional, presenta la corona de corte ligeramente avanzada respecto de la herramienta interior (cazo o bucket, barrena corta, etc.)

Como alternativa, para minimizar los problemas de agua, se puede efectuar previo a la ejecución de la cimentación, un abatimiento del nivel freático mediante la presencia de pozos de agua o mediante inyecciones. En los dos casos, gran parte del éxito se verá condicionado por la correcta ubicación de los estratos por los cuáles se produce la circulación, que pueden presentar cambios laterales de continuidad, fracturación en caso de estratos rocosos, o una presión de agua excesiva y que no permita el correcto sellado de las juntas y que pueden convertir los esfuerzos para el rebaje del nivel del agua, en un resultado baldío.

Si la entubación provisional produce un correcto sellado a la entrada del nivel freático desde los estratos superiores, entonces se colocará la armadura y el hormigón, en condiciones relativamente estancas. Cuando se ha colocado una suficiente cantidad de hormigón y la columna de presión que este produce permite contrarrestar la presión exterior del agua, entonces se retira lentamente el revestimiento provisional (mediante vibrador, osciladora o cabeza de rotación), no siendo determinante la técnica de extracción como causa de posibles deficiencias. La trabajabilidad del hormigón, sin embargo, sí que condicionará el posible tipo de defecto presente.

En el caso de que la fluidez del hormigón sea alta, a medida que se retira la entubación ascendentemente, el hormigón fluye en sentido descendente, reemplazando el espacio ocupado por el grosor de la camisa y rellenando las cavidades debidas a la sobre excavación y que se encuentran con agua. Si el hormigón fluye adecuadamente, desplaza al agua y llena el interior y exterior de la armadura del pilote. El agua desplazada, habitualmente puede quedar retenida de la armadura del pilote hacia el exterior, presentándose un defecto. Por contra, el hormigón entre la armadura y el interior se presenta intacto, con un aspecto liso y brillante debido al contacto con el agua. Si en cambio, debido a la dosificación del hormigón,

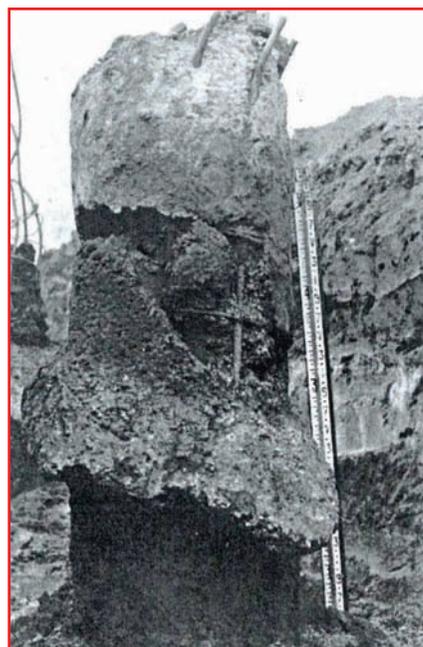


Fig. 9. Defecto en pared de pilote y su bulbo asociado por debajo del agujero. (Thorburn, S., 1977).

este no fluye adecuadamente, se producirá temporalmente una columna estable de hormigón que estará rodeada por el agua que se aloja en la cavidad. El hormigón que se encuentra de la armadura del pilote al exterior de este, se desliza hacia la cavidad desplazándose y mezclándose con el agua. Una

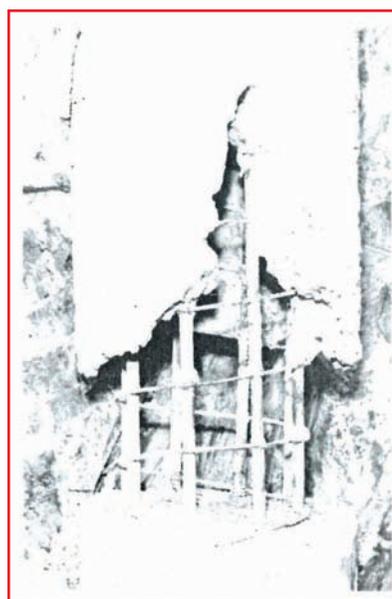


Fig. 10. Discontinuidad en pilote por existencia de gran cavidad. (Thorburn, S., 1977).

masa de hormigón segregado ocupa la cavidad y el agua sube para llenar el vacío producido en las paredes del pilote, (figs. 8 y 9).

En el caso de que la cavidad presente producida por la perforación del pilote, sea suficientemente grande, tanto el hormigón que se encuentra por dentro de la armadura como el que está en contacto con el terreno, se desplazarán hacia el vacío existente, encontrándose una discontinuidad en toda la sección, que será ocupada por el agua, (fig. 10).

3.2. En seco (sin freático)

Se puede producir sobre excavación en condiciones secas, por ejemplo al atravesar pequeños niveles de material granular. En presencia de arenas limpias o gravas redondeadas con poca matriz, el terreno no ejerce el efecto arco alrededor de la perforación, colapsándose. Nuevamente, es de vital importancia que el hormigón circule adecuadamente, para que desplace el aire que ocupa la cavidad. En estos casos, se obtiene una adecuada continuidad del hormigón en el pilote, a pesar de presentarse un sobre ancho en la sección del fuste.

El mayor problema se puede encontrar cuando la sobre excavación se encuentra cerca de la cabeza del pilote. Si el volumen de la sobre



Fig. 11. Formación de bulbo en el fuste de un pilote en terreno seco. (Thorburn, S., 1977).

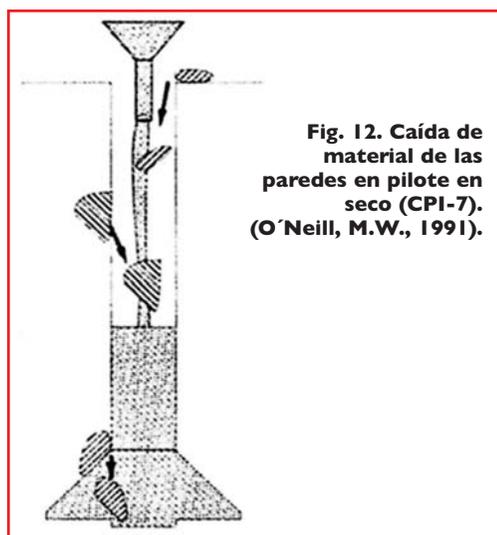


Fig. 12. Caída de material de las paredes en pilote en seco (CPI-7). (O'Neill, M.W., 1991).

excavación es grande en relación al volumen de hormigón introducido durante la extracción de la entubación provisional, se puede encontrar un grave problema al sacar la parte inferior del revestimiento de la parte superior de la cavidad al producirse una rápida pérdida del hormigón hacia el agujero existente. En estos casos, en zonas de rellenos antrópicos, estos pueden introducirse en la perforación del pilote y quedar embebidos en el hormigón.

También hay problemas similares, cuando el pilote se perfora en toda su totalidad en seco (CPI-7) y ocurren desprendimientos en las paredes de materiales granulares o siendo materiales cohesivos, en zonas muy fisuradas. La única corrección posible consiste en utilizar entubación provisional o lodos de estabilización. Según los útiles que utilice el contratista, puede provocar presiones de succión que arrastre materiales al fondo.

4. Sedimentos en punta de pilote

Es una de las causas mejor documentadas, debidas a la pérdida de resistencia en punta por acumulación de material en el fondo del pilote. Pequeños fragmentos de rocas fisuradas y material suelto, se pueden desprender de las paredes de la perforación en tramos donde se entuba parcialmente. Es pues una buena práctica, comprobar el fondo antes del hormigonado. Acciones como la limpieza mediante el cazo o el saneado del fondo mediante aspiración (air lifting), se hacen imprescindibles. También es importante reducir al máximo los tiempos entre la limpieza, la colocación de la armadura y el

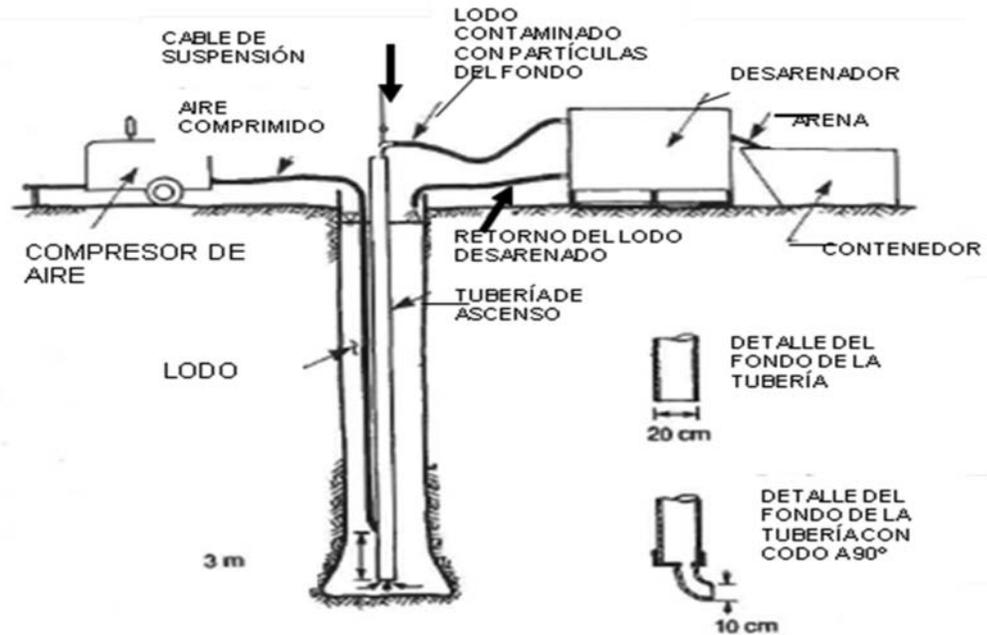


Fig. 13. Limpieza del fondo mediante aspiración de aire.

hormigonado.

Se recomienda no exceder en un 5% de la sección de la punta del pilote, el área cubierta por el detritus.

El tema es de especial trascendencia, especialmente en aquellos pilotes que trabajan por punta, ya que si la carga no se transmite directamente al estrato resistente, se requiere un asiento importante para desarrollar

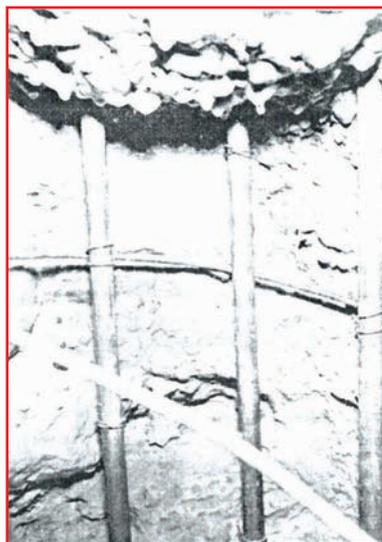


Fig. 14. Ejemplo de fondo de pilote donde se presentó acumulación de limos previa al hormigonado. (Thorburn, S., 1977).

plenamente la transferencia en punta.

En la fig. 14, se produjo una acumulación de limos en la base, durante el lapso de tiempo entre el fin de la perforación y la colocación de la armadura. El peso propio de la armadura permitió hincar la armadura unos 50 cm. en el sedimento limoso, que tuvo suficiente consistencia para soportar el peso del hormigón.

Se requiere una correcta planificación de obra, en la que los tiempos de espera sean breves. Una vez finalizada la perforación del pilote, hay que colocar rápidamente la armadura y minimizar la espera del hormigonado para

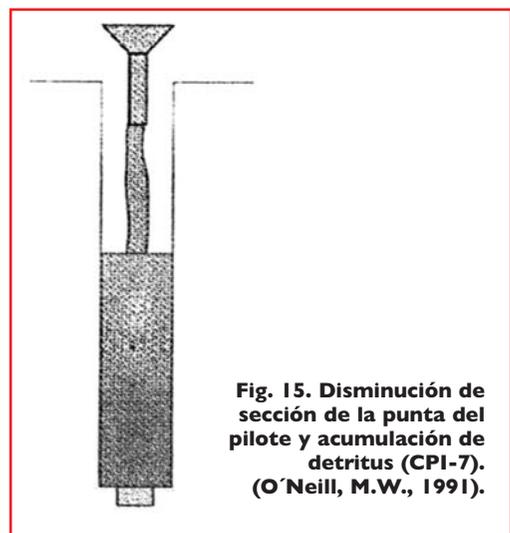


Fig. 15. Disminución de sección de la punta del pilote y acumulación de detritus (CPI-7). (O'Neill, M.W., 1991).

evitar sedimentaciones.

Si la maquinaria usada no es suficientemente potente, puede pasar que en un pilote de gran diámetro que empotre la punta en roca blanda, no perfora toda la sección teórica por falta de par y empuje, provocando una punta más pequeña de la teórica, susceptible de acumular residuos en el fondo.

Cuanto más profundo es el pilote, menos se ve afectado por la suciedad del fondo en su comportamiento carga-asentamiento. En un grupo de pilotes, la trascendencia del defecto dependerá de su localización y de si este se concentra particularmente dentro del conjunto, pudiendo producir rotaciones y momentos significativos en los pilotes.

En ocasiones, en un pilote perforado y rellenado con una mezcla de suelo-cemento, se coloca un pilote prefabricado, eliminando los problemas de sedimentos en punta del pilote, cuellos, etc. y además, aceptan más carga que los pilotes perforados convencionales.

5. Extracción de la entubación provisional

En el caso del pilote tipo CPI-5 (con entubación perdida), se utiliza una entubación exterior temporal y una interior perdida. Durante el hormigonado, este se aloja en el interior de la tubería perdida, previamente a la extracción del revestimiento provisional que se encuentra exteriormente. El estado del interior del revestimiento también es importante, debiendo ser liso y sin restos de materiales que permitan al hormigón que se adhiera.

De la misma manera, en el caso de extracción del revestimiento provisional en pilote CPI-4, se encuentran defectos asociados con un hormigón que no es dócil y/o cuando pasa demasiado tiempo entre la fabricación del hormigón en planta y la extracción de la entubación (más de una o dos horas). El problema se agrava en días especialmente calurosos, en que el endurecimiento del hormigón se acelera. Las fuerzas friccionales ejercidas entre el hormigón y el revestimiento pueden llegar a ser de tal magnitud que el hormigón y la armadura pueden ascender, originando un cuello en el pilote, donde todo o parte de la sección será ocupada por terreno o agua, (fig. 17). Si la base de la armadura está suficientemente embebida en la parte inferior

del hormigón del pilote, entonces, sólo el hormigón exterior a la armadura ascenderá. Debido al ascenso de este hormigón, el terreno circundante puede entrar en el cuerpo del pilote, formando inclusiones de diversas formas y dimensiones, localizándose a diferentes profundidades en el pilote, dependiendo de la fluidez del hormigón, la velocidad de extracción y de la consistencia del terreno, (fig. 18).

El entubado provisional, suele tener el avance de perforación ligeramente mayor en diámetro que el resto de la sección de la tubería, con lo cual no se produce un contacto íntimo entre el revestimiento y el terreno, pudiéndose perder buena parte de rozamiento lateral en la zona revestida; de manera que el fuste no tenga apenas rozamiento, por falta de presión entre el hormigón y el subsuelo, (fig. 19). Ello se puede mitigar mediante un hormigón que se desplace correctamente y un ligero movimiento ascendente-descendente de la tubería tremie.

En presencia de arenas y limos con nivel freático, adquiere especial importancia que la punta del revestimiento esté suficientemente sellada, esto es posible si el estrato en el que clavamos el revestimiento tiene un grosor suficiente y/o si la dureza del terreno permite efectuar la operación correctamente. En caso que el estrato no tenga el grosor suficiente para sellar, se puede optar por verter una cantidad adecuada de lechada de cemento sobre la parte superior del tramo a empotrar, antes de la colocación del tramo de entubación en este nivel. Se efectúa una mezcla con la barrena corta, agitando la mezcla rica en lechada con el agua presente que incorpora partículas de limo y arena procedentes de la excavación y se introduce el revestimiento hasta el estrato mencionado. La lechada que queda en el interior de la tubería se diluye añadiendo agua y perforando ligeramente por el interior del entubado con el efecto de debilitar la mezcla interior. Se mantiene en reposo toda la noche, permitiendo que el cemento endurezca, formando una especie de collar de sellado alrededor de la entubación, a la mañana siguiente se puede continuar normalmente con la perforación.

En ocasiones, puede ser de interés la utilización de entubado provisional, combinado con lodos o incluso agua. Por ejemplo en presencia de nivel freático, el uso de lodo tixotrópico, facilita la limpieza de la punta del

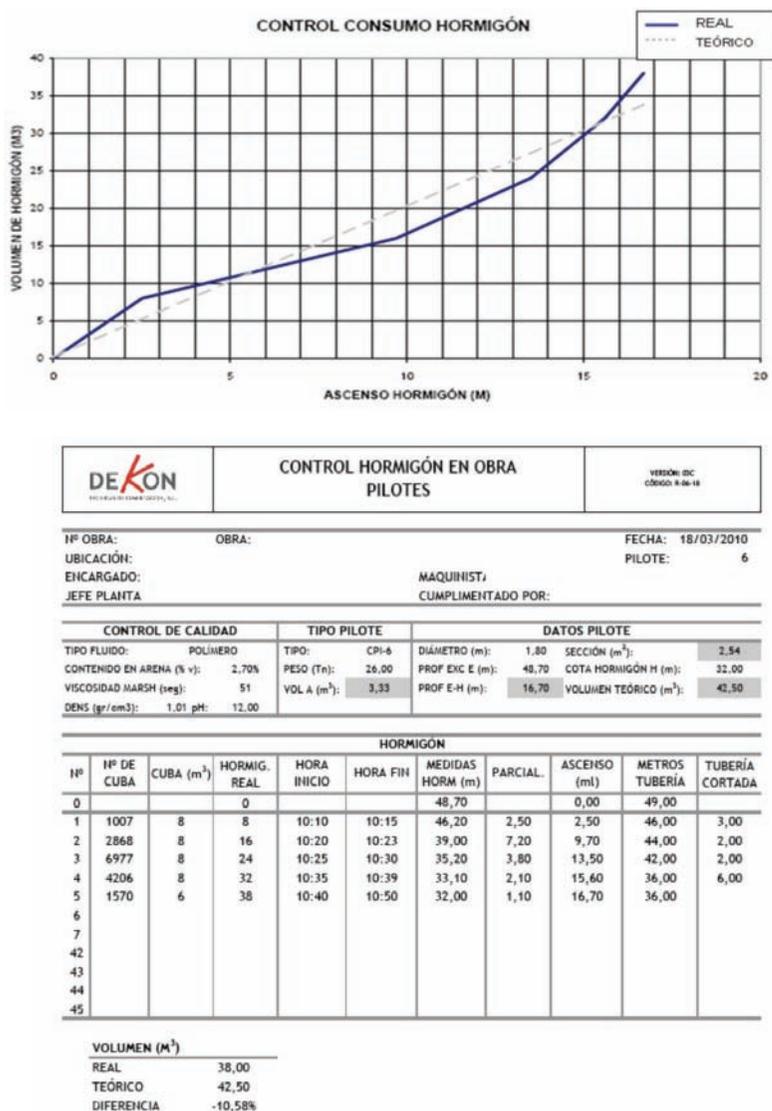


Fig. 16. Parte de control de consumo de hormigón y gráfico con el gasto teórico y real. Se observa desprendimiento entre 5,5 y 15m respecto del fondo.

pilote, mediante el desarenado del lodo que mantiene en suspensión, el detritus producido por la perforación del entubado. Lo cual permite tener más tiempo entre el final de la excavación y la colocación de la armadura, o entre esta y el inicio del hormigonado, ya que la tixotropía del lodo retrasa la precipitación de partículas.

La utilización de polímeros, suponen un avance técnico y actúan de manera diferente que la bentonita, debido a que los polímeros no presentan tixotropía (a menos que se añadan otros compuestos) y aceleran la precipitación de las partículas, lo cual también es de interés, porque después

de limpiar el fondo, garantizan que no se producirá acumulación de partículas en la punta durante la colocación del armado ni el hormigonado. Hay que ser muy cuidadoso debido a que el lodo podría quedar atrapado en caso de existir cavidades y producirse una contaminación del hormigón del pilote a medida que se retira la entubación provisional.

Antes de la extracción del entubado, en su interior debe haber suficiente columna de hormigón, de manera que la altura en el interior exceda o al menos iguale la presión hidrostática. Por su parte, la entubación deberá presentar un grosor suficiente tal que no se pueda deformar debido a las presiones del terreno y el agua (usualmente entre 7 a 10 mm de grosor de chapa).

En terrenos muy blandos, con valores de resistencia al corte no drenado inferior a 15 o 20 kN/m² la presión lateral del hormigón, puede exceder fácilmente la resistencia pasiva del terreno, produciendo irregularidades en la sección del pilote. El seguimiento se puede realizar, mediante la curva de consumo real del hormigón, (fig. 16).

Llevados a un extremo, no se forma un cuello en el hormigón sino que se puede producir separación total en el hormigón, creando una discontinuidad. Una cavidad en el hormigón que ocupe un 15 % de la sección del pilote y que penetre hasta el interior de la armadura, puede reducir la resistencia a flexión del orden de un 30 %, en comparación con un pilote intacto.

Si el defecto se produce en un grupo de pilotes, la reducción de la rigidez del grupo es

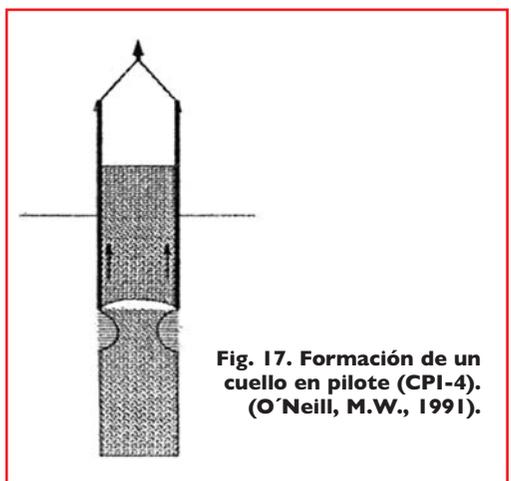


Fig. 17. Formación de un cuello en pilote (CPI-4). (O'Neill, M.W., 1991).

inferior que la que se produce en un pilote aislado, debido a la habilidad del resto de la longitud del pilote no dañada en el grupo para soportar una mayor proporción de la carga. Si dentro del grupo de pilotes se combinan algunos con defectos y otros sin, se producirá una redistribución de la carga presente en el grupo. La carga en los pilotes defectuosos se reduce, mientras que el resto de pilotes se ven obligados a soportar más carga. Bajo cargas verticales, el grupo responderá mediante un movimiento lateral y se producirá rotación, produciéndose momentos en las cabezas de los pilotes. Cuanto más asimétrica sea la localización de los defectos, mayor será la respuesta lateral inducida.

Para cuantificar el grado de afección del defecto estructural, Poulos (1997), desarrolla un "factor de integridad estructural" F_{SI} :

$$F_{SI} = (E_d A_d L) / (E A L_d)$$

donde,

E =Módulo de Young del pilote intacto

A =Área del pilote intacto

L =Longitud total del pilote

E_d =Módulo de Young de la parte dañada del pilote

A_d =Área de la parte defectuosa del pilote

L_d =Longitud de la parte dañada del pilote.

Si el pilote está intacto, F_{SI} es infinito; si el pilote está seriamente afectado, F_{SI} será pequeño (0.1 o menor), con un límite inferior de cero.



Fig. 18. Cavity in a pile due to soil entry during the removal of the provisional casing. (Thorburn, S., 1977).

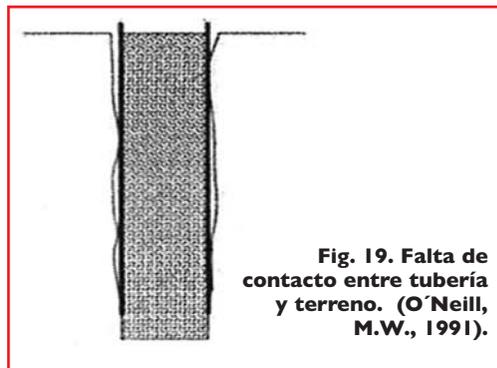


Fig. 19. Falta de contacto entre tubería y terreno. (O'Neill, M.W., 1991).

Es conveniente que el entubado alcance un sustrato impermeable, ya que de esta manera se puede producir un sellado efectivo de la perforación. En caso contrario y en presencia de agua, la sedimentación del detritus de la excavación es muy rápida, pudiendo afectar a la capacidad de soporte de la punta del pilote. Es imprescindible realizar una limpieza de fondo, ya que de otro modo durante el hormigonado, no se podrá desplazar este residuo sino que se acumulará, creando una mezcla de hormigón pobre o segregado.

6. Exceso de armado en el pilote

Se refiere a aquellas armaduras que no presentan suficiente espacio para que el hormigón circule sin obstáculos, debido a un armado excesivamente denso. El problema se agrava si además, el hormigón suministrado es poco fluido. En líneas generales, una apertura entre armaduras longitudinales y transversales de 20 cm es suficiente para que el hormigón fluya sin oposición. Es usual que a la armadura, también se le añadan tubos para los ensayos de integridad, lo cual también hay que tener en cuenta de cara a proveer suficiente espacio disponible.



Fig. 20. Falta de penetración del hormigón a través del armado existente. (Brown, D. A., 2004).

Todo aquello que dificulte el ascenso y desplazamiento lateral del hormigón, incrementará la probabilidad de que se queden atrapados entre las paredes de la excavación y la armadura detritus de la excavación o restos de bentonita, en caso de utilizarse.

Es una buena práctica durante el hormigonado, observar si existen diferencias remarcables entre la cota del hormigón por dentro y por fuera de la armadura, es aceptable que haya una diferencia de unos 50 cm más baja en el exterior y nos puede servir como un indicador de que algo no funciona correctamente (exceso de armadura, trabajabilidad del hormigón inadecuada, fluido de estabilización sucio,...).

Las armaduras deben tener una altura mínima tal que al menos, se sitúen un metro por debajo de la tubería provisional, con el fin de prevenir el movimiento de la armadura al extraer el revestimiento.

7. Diseño de la mezcla de hormigón inadecuada

Hay que tener presente que los condicionantes de puesta en obra en una estructura enterrada, son diferentes que los de un elemento hormigonado por encima de la superficie, con ello hay que evitar ciertas retenciones que se encuentran en ocasiones, para suministrar hormigones con un elevado



Fig. 21. Penetración parcial del hormigón en la armadura debido a un cono de Abrams bajo. (Thorburn, S., 1977).

cono de Abrams. Se producen más problemas por tener un cono bajo, que por usar un cono excesivamente grande. Es aconsejable, utilizar hormigón que presente un cono cercano a 200 mm, que además no tenga una pérdida de cono de más de 50 mm durante el periodo de puesta en obra, independientemente de cuánto tiempo se trate. Este hecho, es relevante en periodos especialmente calurosos del verano y como que la trabajabilidad del hormigón a lo largo del hormigonado depende fuertemente de la temperatura, es necesario aumentar la dosificación de retardadores del fraguado.

El ensayo del cono de Abrams, se utiliza para determinar la fluidez del hormigón en obra, sin embargo, la cohesión o la resistencia a la segregación es difícil de definir. Cuando sea posible, es preferible árido redondeado, con un contenido razonablemente alto de arena y plastificante.

Un hormigón fresco, se comporta como un fluido Bingham (actúa como sólido en condiciones estáticas, requiriendo un esfuerzo mínimo denominado rigidez o esfuerzo de fluencia, para comenzar a fluir; comportándose como un fluido Newtoniano, a partir de ese esfuerzo mínimo).

La trabajabilidad del hormigón, depende principalmente de dos propiedades físicas, como son la rigidez o esfuerzo de fluencia y la viscosidad plástica. El cono de Abrams es un ensayo ampliamente extendido en obra gracias a la sencillez, rapidez y bajo coste que supone; sin embargo, tan sólo nos informa sobre la fluencia. La viscosidad plástica, es un parámetro importante y controla, por ejemplo, la capacidad de bombeo del hormigón. Para obtener una información completa y conocer las dos propiedades físicas citadas, se usan los reómetros, los cuáles son caros, requieren personal especializado y difícilmente se encuentran en obra, ya que se trata de un utillaje propio de laboratorio.

No es extraño, que se produzcan discusiones entre el personal de obra que ejecuta el pilote y el suministrador del hormigón, cuando los primeros solicitan un hormigón que fluya con mayor facilidad y el suministrador de la planta se ampara en que los resultados del ensayo del cono Abrams, se encuentran dentro de las especificaciones del proyectista. Como se puede observar en la fig. 22, queda claro que

puede haber muchos hormigones que presenten la misma rigidez y por tanto el mismo valor de lectura del cono y sin embargo, tengan unas características totalmente diferentes, ya que sus viscosidades plásticas difieren en gran medida. Por desgracia, es difícil sólo con el ensayo del cono Abrams, poder fijar claramente las necesidades de la obra.

Si la mezcla de hormigón está correctamente diseñada y consiste en una matriz continua de una pasta de agua-cemento con áridos y finos en suspensión, entonces existirá el equilibrio hidrostático entre la columna de hormigón en el pilote y la columna de agua presente en el terreno. Por el contrario, un hormigón que presente una baja trabajabilidad que carezca de continuidad hidráulica, en el caso de producirse ocasionalmente una entrada de agua en el pilote, se diluirá seriamente la pasta de cemento, produciendo una falta de agregación en la mezcla.

Sea cual sea el método utilizado para perforar el pilote, el hormigón tiene que poder desplazar cualquier resto de terreno, agua o fluido de estabilización, para lo cual se requiere un hormigón fluido.

Por otro lado, si los tiempos entre la descarga de los camiones cuba se dilatan, se inicia la exudación en el hormigón previamente hormigonado, que debilitará la adherencia lateral del pilote.

En el siguiente número (noviembre-diciembre) de OBRAS URBANAS aparecerá publicada la 2ª parte.

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$$

Ecuación de Bingham

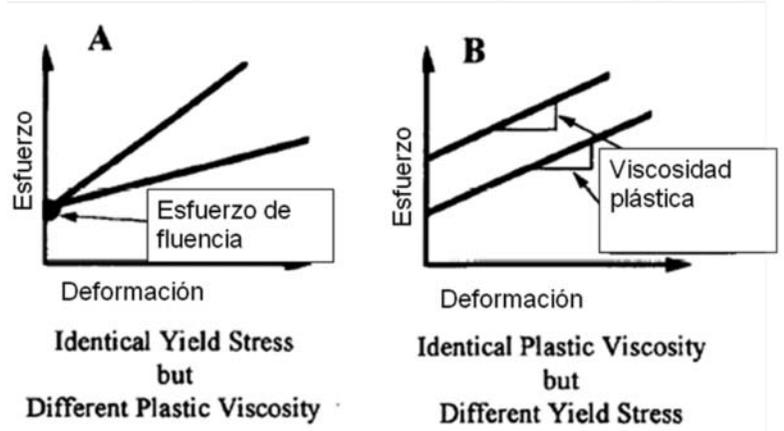
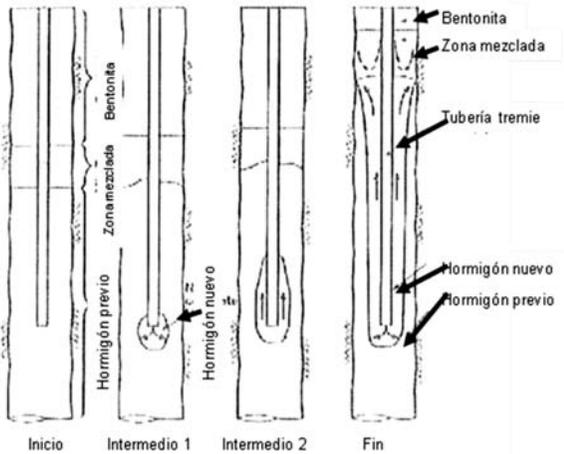


Fig. 22. Diagrama de rigidez y viscosidad plástica en un hormigón fresco. (Ferraris, C.F., 1998).

Cono Abrams	> 180 mm
Relación agua/cemento	< 0.6
Árido	Idealmente árido redondeado, tamaño máx. 20 mm
Contenido de arena	35 al 45 % del peso total del árido
Cemento	>= 375 kg/m ³

Tabla 1. Dosificación de hormigón para pilotes, UNE-EN 1536 modificada, (AENOR, 2.000)

www.dekon.es



Figs. 23 y 24. Trayectoria del hormigón durante su vertido y etapas de hormigonado.

Problemas de ejecución en pilotes perforados. Causas y soluciones. (2ª parte)

David Núñez Becerra, Director Técnico; Dekon, Técnicas de Cimentación, S.L.

Introducción

Se presenta a continuación la 2ª parte del artículo correspondiente a la continuación del publicado en la anterior revista nº 23 (Septiembre-octubre) de OBRAS URBANAS, sobre la sistematización de los defectos que se pueden producir durante las fases de ejecución de pilotes perforados, abarcando los tipos que se denominan, siguiendo los criterios de las Normas Tecnológicas de la Edificación (NTE, Ministerio de Fomento, 1.998): CPI-4 (pilote con entubación recuperable), CPI-5 (con entubación perdida), CPI-6 (con fluido de estabilización), CPI-7 (en seco) y CPI-8 (hormigonado a través de la barrena central).

8. Flujo de agua o nivel freático. Agua artesiana

Se refiere a aquellos pilotes que se han ejecutado correctamente y que posteriormente a la extracción del entubado pueden presentar problemas por la presencia del nivel freático. Se encuentra allí donde está presente un elevado gradiente hidráulico en terrenos altamente permeables, por ejemplo en zonas sometidas a mareas. El efecto es una rápida entrada de agua que erosiona el cemento en el hormigón fresco y un lavado del árido, descubriendo al ataque químico del agua la armadura del pilote. Ante tal situación, la solución pasa por la colocación de una camisa perdida (pilote CPI-5).

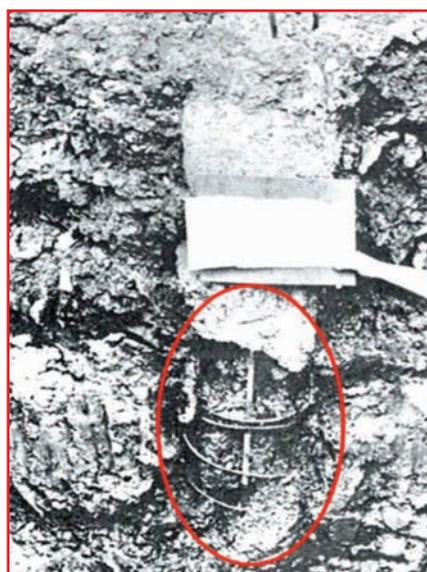
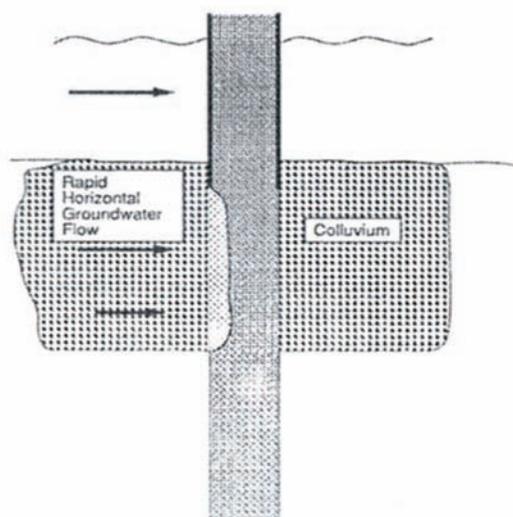


Fig. 25. Lavado del hormigón en el lado del flujo de agua. (O'Neill, M.W., 1991). Fig. 26. Erosión de un pilote por entrada de un flujo de agua después de la retirada del entubado provisional. (Thorburn, S., 1977).

Como primera aproximación, el hormigón se puede tratar como un medio con dos fases (agua y partículas sólidas), de manera que se requiere un metro de hormigón, para contrarrestar un metro de columna de agua. A corto plazo, el hormigón actuará como un medio viscoso de una sola fase (contrarrestando 2,4 metros de columna de agua por cada metro de hormigón), pero existe un riesgo de percolación a través del hormigón con el paso del tiempo antes del endurecimiento si existe menos columna de hormigón que la necesaria para anular la carga hidráulica presente.

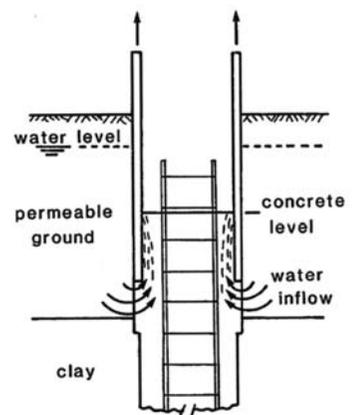
El elevado gradiente hidráulico, produce que en caso de utilización de entubado provisional, al extraer este ascendientemente, haya una entrada del flujo de agua en el hormigón de las paredes del pilote, incrementando la relación agua/cemento y produciendo una agitación en las partículas de cemento que retrasan el fraguado del conjunto. En presencia de un nivel suelto de arenas, ocurre que el hormigón (que presenta un retardo en su fraguado debido a la entrada de agua), se escurre hacia abajo introduciéndose en el nivel blando arenoso, provocando una disminución de la sección del pilote, justo por debajo del hormigón superior, que está protegido por la camisa y que puede iniciar su fraguado. El proceso, se completa con el colapso de la arena blanda, ocupando el hueco que se ha formado en el hormigón.



Fig. 27. Estrangulamiento en la sección de un pilote. (Hobbs, N.B., 1957).

En materiales aluviales y coluviales, en presencia de un flujo de agua horizontal mayor de aproximadamente 0,3 m/s, se puede encontrar un lavado del hormigón.

Para encontrar el efecto de la fig. 28, la presión del agua tiene que exceder el doble de la de la columna de hormigón, en la base del revestimiento. El problema, se subsana llenando el interior del pilote de hormigón o con agua.



Figs. 28 y 29. Efecto de la entrada de agua en un pilote. (Thorburn, S., 1977 y Fleming, K., 2008).

Si se abate el nivel freático, hay que prestar cuidado al arrastre de finos que se efectúa por los equipos de bombeo, especialmente en zonas de arenas y limos, que provocan desplazamientos no deseados en el terreno. Se establece, por ejemplo, un criterio por el cual si el agua bombeada mantiene en suspensión, una cantidad de finos superior a cierto valor, se prohíba la extracción de agua.

9. Uso inadecuado del fluido de estabilización

En los pilotes denominados CPI-6, se utiliza fluido de estabilización a la vez que se efectúa la perforación. El fluido puede ser principalmente, de origen mineral del tipo bentonita (el más usual), sepiolita (para ambientes marinos o salobres), o bien, artificial como es el caso del polímero (pudiéndose utilizar los del tipo acrílico o vinílico). La utilización de este tipo de pilote, vendría limitado en el caso de terrenos de muy alta permeabilidad donde el fluido fluye rápidamente y en terrenos especialmente blandos donde no es posible ejercer la suficiente capacidad de soporte.

Por lo que respecta a los lodos minerales, especialmente en presencia de sustratos granulares, un excesivo tiempo de espera entre la perforación y el hormigonado, produce un crecimiento excesivo del cake en las paredes de la cimentación, implicando una reducción del rozamiento lateral entre el hormigón y el terreno. Aunque este hecho en sí, no puede considerarse un defecto, supone una pérdida en la calidad del producto final y por tanto de la capacidad de transmisión de tensiones al terreno, pudiéndose traducir llevados a un extremo, en asientos excesivos u otros problemas que pueden derivar en momentos no deseados en el encepado de un grupo de pilotes.

En ocasiones, se utiliza la combinación de pilote con entubación recuperable (CPI-4), añadiendo un lodo mineral o artificial (CPI-6), para facilitar el avance del revestimiento a través de materiales granulares. Una vez alcanzado un estrato impermeable, se deja de utilizar el fluido y se sigue la perforación del pilote en seco.

Para que el fluido tenga una suficiente carga hidrostática, es necesario que al menos se encuentre 1,5 m por encima del nivel freático, siendo preferible incluso una diferencia de cota mayor, sobre todo si existen rellenos o estratos de baja compacidad y alta permeabilidad. En cualquier caso, para el pilote CPI-6, se recomienda la utilización de un tramo de entubado en el inicio de la perforación (su longitud variará según disponibilidad de los medios existentes, siendo común 3 y 6 m), que actuará a modo de murete guía proporcionando una correcta verticalidad desde el inicio del pilote y evitando que la entrada y salida constante del útil de perforación produzca una carrera de marea en la cabeza del pilote, siendo susceptible de producir una socavación de la base.

Una de las propiedades principales del uso de lodos minerales, es que mantienen las partículas provenientes de la perforación en suspensión, debido a las propiedades tixotrópicas de la bentonita y la sepiolita. Este hecho, permite que el detritus tarde más tiempo en llegar al fondo, al mismo tiempo que aumenta la carga hidrostática del fluido, ya que al incorporarse a él, incrementa la densidad del conjunto. Estas ventajas, implican un correcto seguimiento de las propiedades físico-químicas del fluido (generalmente el pH, la densidad, la viscosidad y el contenido de arena)

que tienen que estar en todo momento controladas dentro de unos límites, para que puedan actuar sin interferir durante el hormigonado, (tabla 4). Un lodo excesivamente denso o con demasiada arena en suspensión, será desplazado con dificultad por el hormigón, creando acumulaciones de arena o hormigón pobre en la punta del pilote o en los laterales de esta, acumulaciones de bentonita y arena en las corrugas de las armaduras y un excesivo cake en las paredes, que será sólo parcialmente ripado durante el ascenso del hormigón.

Si el hormigón se mezcla con la bentonita, tendremos un compuesto de bentonita-cemento, que presentará una resistencia inferior a la del hormigón. Los restos de bentonita en las paredes del pilote, tendrán un efecto lubricante, reduciendo la adherencia de la interfase terreno-hormigón. De manera similar ocurre con posibles restos de lodo en las armaduras, penalizando la unión hormigón-armadura.

La forma en que el hormigón produce el desplazamiento del lodo, debe cumplir las leyes de la reología. Las propiedades de un hormigón fresco y fluido y las de una suspensión de bentonita, son similares aunque difieren en magnitud. Los dos materiales, se comportan aproximadamente como un fluido del tipo Bingham, que vendría a representar una deformación elástica hasta que se adquiere un nivel de esfuerzo determinado, a partir del cual fluye como un líquido. Como fluidos, las propiedades que mejor definen su comportamiento son el esfuerzo de fluencia y la viscosidad plástica.

Material	Esfuerzo de fluencia	Viscosidad Plástica	Densidad
	(MPa)	(Pa.s)	(kg/m ³)
Hormigón	250-1.000	20-600	2.200-2.500
Suspensión de bentonita	0-25	10-2-5.10-2	1.020-1.300

Tabla 2. Comparación entre las propiedades que presentan como fluido una suspensión de bentonita y un hormigón fresco. (Fleming, W. K., 1977).

Como se puede observar en la tabla 2, existe una gran diferencia en el esfuerzo de fluencia, siendo mucho menor el de la bentonita, con lo cual parecería razonable pensar que el hormigón será muy efectivo desplazando a la bentonita. Sin embargo, a la práctica este hecho tiene ciertas limitaciones, por un lado, hay cierta

parte de la bentonita que penetra en la porosidad del terreno, creando una mezcla con una resistencia al cizallamiento, muy superior al presentado en la tabla anterior, con lo cual el hormigón no será muy eficiente en la limpieza de las paredes de la excavación durante su ascenso en el hormigonado. Además, también se generan reacciones químicas como la migración del hidróxido cálcico del hormigón al cake, aumentando la resistencia a cortante de este último. Este aspecto, es especialmente importante cuando el terreno es granular y permeable. En caso de presentarse un material cohesivo, prácticamente no se forma cake en las paredes y por tanto, existirá un mayor contacto entre hormigón y terreno.

Material	Resistencia al corte (Pa)
Suspensión de bentonita al 6 % (14h)	600
Mortero fluido	9.500
Cake bentonita	74.000
Hormigón en masa	3.400.000

Tabla 3. Resistencias al corte de un lodo, mortero y un cake de bentonita. (Farmer, 1970, ampliado).

La resistencia al cortante del cake, es aproximadamente unas 7,5 veces mayor que el de una mezcla de mortero fluido y unas 120 veces mayor que una suspensión de bentonita (con una concentración del 6% a las 14 horas).

CARACTERÍSTICAS DE SUSPENSIÓN DE BENTONITA				
PAREMETRO	UNIDAD	CASO DE USO		
		INICIO EXCAVACIÓN	INICIO DESARENADO	ANTES DE HORMIGONAR
Contenido en arena	% (Vol.)	-	-	< 3
Viscosidad Marsh	Seg.	32 a 50	32 a 60	32 a 50
Densidad	g/ml	< 1.10	-	< 1.15
PH		7 a 10	7 a 11	-

Tabla 4. Requerimientos usuales en lodos tixotrópicos, según UNE-EN 1536 modificada (Aenor , 2000).

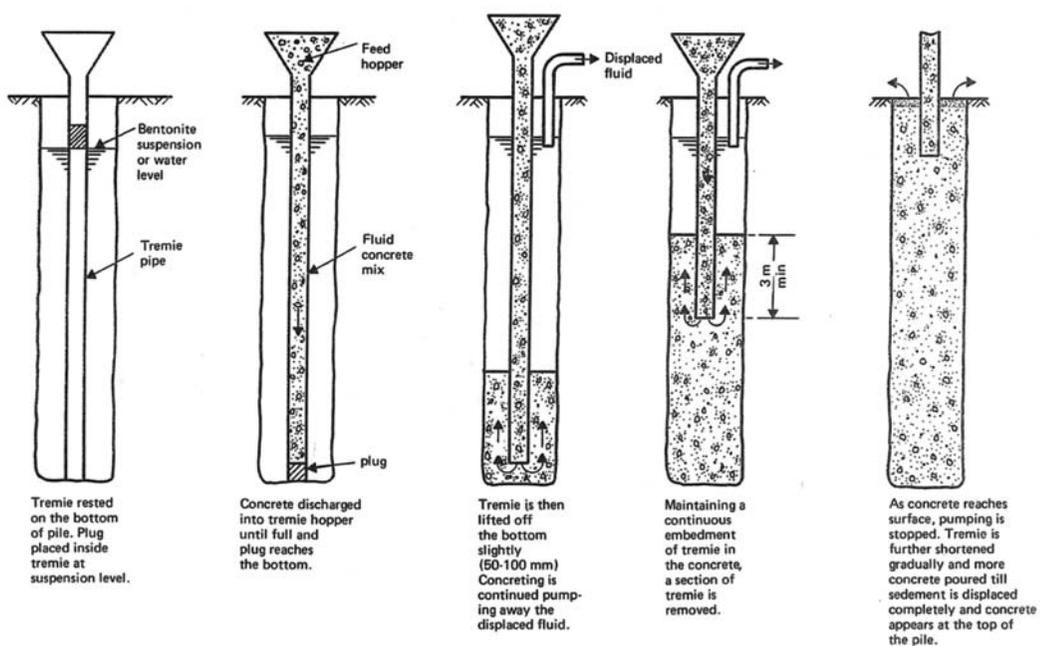


Fig. 30. Fases de hormigonado mediante tubería tremie. (Fleming, W. K., 1977).

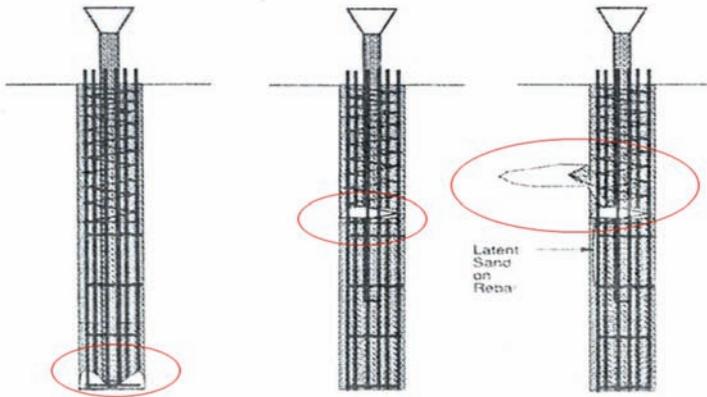


Fig. 31. Defectos durante la utilización de la tubería tremie. (Fleming, W. K., 1977).

La técnica de perforación así como los útiles utilizados, condicionan las irregularidades presentes en las paredes del pilote, las cuáles también vendrán influenciadas por los diferentes estratos atravesados.

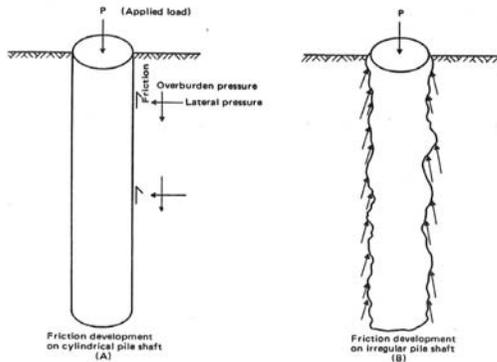


Fig. 31. Defectos durante la utilización de la tubería tremie. (Fleming, W. K., 1977).

En el caso del pilote que presenta irregularidades en las paredes, se producirá una resistencia adicional. Esta será mayor, al serlo la protuberancia.

La fricción de un pilote perfectamente circular, se caracteriza por una caída abrupta en la curva carga/asiento, mientras que el pilote más irregular, tiene una caída en la gráfica más progresiva, (fig. 33).

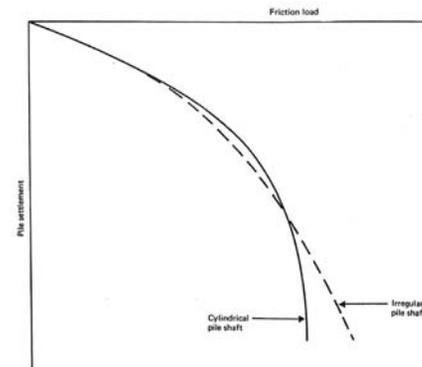


Fig. 33. Gráfica de carga friccional/asiento en las paredes cilíndricas e irregulares de un pilote. (Fleming, W. K., 1977).

Una de las técnicas usadas para perforar, es mediante "bucket" (cazo), el movimiento ascendente-descendente que se provoca durante la perforación, crea succiones locales (efecto pistón), corrientes de "by-pass" y variaciones en el nivel de la bentonita debidos al volumen desplazado por el bucket y el Kelly.

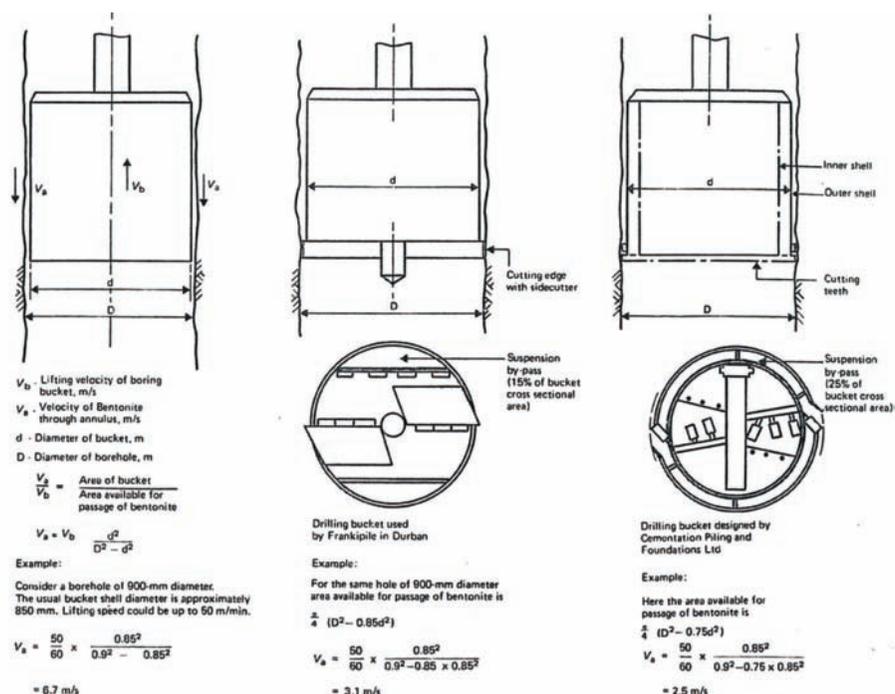


Fig. 34. Efecto "by-pass" en la velocidad de la bentonita a través del bucket. (Fleming, W. K., 1977).

Las velocidades del fluido y la succión local, pueden concluir con un considerable sobre ancho, que depende de la geología de los estratos que se atraviesan, las dimensiones del pilote y del equipo que se use. Existen buckets especialmente diseñados para minimizar y reducir el daño que se puede generar en las paredes, permitiendo el mayor paso posible de la bentonita, (fig. 34).

10. Perforación de un pilote cerca de otro recién hormigonado

Parte del soporte lateral del hormigón se pierde, al perforar un pilote al lado de otro con hormigón fresco. El hormigón fluido del fuste del primer pilote, se desplaza hacia el terreno desprendido en el fuste del segundo, pudiendo mover la armadura y creando cavidades.

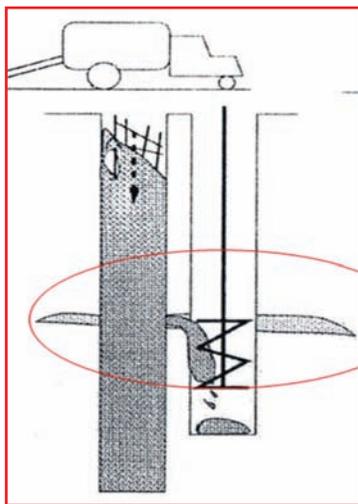


Fig. 35.
Perforación de un pilote cerca de otro con hormigón fresco. (O'Neill, M.W., 1991).

Como buena práctica, considerar al menos una distancia entre pilotes de 5 diámetros, para no crear interferencias entre pilotes ejecutados con hormigón en proceso de curado y pilotes por ejecutar.

11. Tránsito en terreno blando, cerca de un pilote recién hormigonado

En este caso, el pilote se ha ejecutado correctamente, pero estando aún el hormigón tierno, al desplazarse maquinaria pesada (la misma pilotadora) por la superficie de trabajo en un terreno con poca capacidad portante ($< 1 \text{ kg/cm}^2$), se deforma lateralmente la cabeza del pilote. A menos que sea muy evidente, el problema se suele detectar mediante comprobación topográfica.

Es evitable utilizando un tramo corto de entubación perdida en la cabeza del pilote o efectuando una mejora general de la plataforma de trabajo.

Puede ser necesario planificar de antemano, una secuencia de trabajo para evitar influir en los pilotes adyacentes.

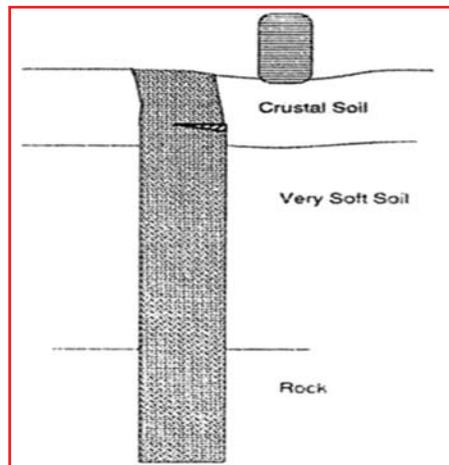


Fig. 36. Empuje lateral en cabeza de pilote por hundimiento de plataforma de trabajo. (O'Neill, M.W., 1991).

12. Problemas durante la perforación

En un pilote perforado con hélice continua (CPI-8) o en seco (CPI-7), en presencia de arcillas, en las paredes del pilote pueden quedar superficies lisas, que al extraer el útil de excavación, disminuyen en gran proporción el rozamiento lateral. Para prevenir el fenómeno, se aconseja utilizar útiles especialmente diseñados para la limpieza de las paredes antes del hormigonado. Un problema similar se encuentra en el fondo del pilote, por ejemplo en presencia de materiales granulares, al final de la perforación. También se aconseja una limpieza de la base con un útil con la geometría adecuada y suficientemente estanco.

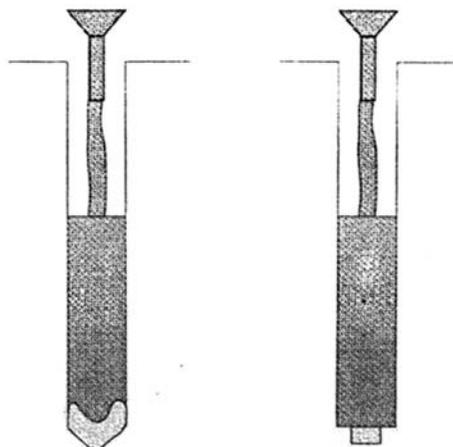


Fig. 37. Falta de limpieza de fondo en pilote. (O'Neill, M.W., 1991).

De la misma manera, si la pilotadora carece de par de rotación suficiente, al perforar en roca blanda, quedará probablemente un residuo en el fondo.

En los pilotes CPI-8, se utiliza una barrena larga, vacía en su sección interior a través de la cual se hormigona al retirar ascendentemente la barrena después de la perforación.

El principal problema en este tipo de pilote, consiste en la velocidad de ascensión de la barrena mientras se hormigona. Por este motivo, se puede utilizar instrumentación de seguimiento en la máquina, donde se controlan la rotación, la presión del hormigón, el volumen de hormigón suministrado y la profundidad de la perforación.

Se han encontrado numerosos defectos por una rápida extracción de la barrena en la fase final de la ejecución. Cuando el hormigón asciende de la perforación, puede haber la incorrecta percepción de que todo el terreno ha sido desplazado, retirando rápidamente la barrena, con lo cual el terreno de las paredes puede caer en el pilote, contaminando el hormigón.

También ocurren problemas debidos a una excesiva rotación de la barrena (pilote CPI-8), cuando se encuentra un estrato duro y particularmente, cuando el terreno superior está formado por arenas y limos bajo el nivel freático. La lenta excavación, en relación al número de rotaciones, hace que la barrena empiece a cargar desde los laterales más que respecto de la base, lo cual reblandece el

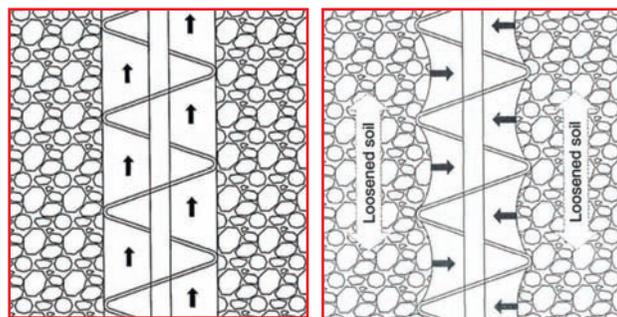


Fig. 38. Representación de una situación estándar en una perforación de pilote CPI-8, respecto a un exceso de rotación. (Fleming, K., 2008).

terreno, reduciendo la fricción en las paredes del fuste del pilote, (fig. 38). Para evitar este efecto, es necesario contar con un equipo suficientemente potente, para que pueda perforar el nivel duro a un ritmo constante y adecuado. Se aconseja en estos casos, no efectuar más de 4 a 7 vueltas de la barrena, por metro de avance, hormigonando el pilote después de su perforación, no sacándose la barrena fuera del agujero, puesto que aún se empeoraría más la descompresión en las paredes.

Se debe tener especial cuidado, cuando se construye el pilote cerca de propiedades que presenten una cimentación superficial apoyada sobre arenas, en la que se puede desarrollar una subsidencia debido a la sobre excavación y reblandecimiento de la arena. La zona de afección de los asientos, se puede extender hasta un radio de 2/3 de la profundidad del pilote.

Cuando se extrae la barrena en los pilotes CPI-8 durante el hormigonado, hay que rotar en el mismo sentido que al perforar (el efecto permite limpiar el detritus del fondo), hasta que el hormigón llena la parte inferior de la barrena y luego hay que ascender sin rotación.

En los pilotes CPI-8, se coloca la armadura una vez hormigonado el pilote. La armadura, no suele superar los 9 metros de longitud, debido a las dificultades que suponen su introducción, (fig. 39).

Es necesario colocar un número generoso de separadores redondos, que garantizan que la jaula se sitúa concéntricamente en el hormigón.

Se presenta a continuación, un resumen sobre los tipos y causas de defectos en pilotes perforados, así como su prevención:



Fig. 39. Colocación forzada de armadura en un pilote tipo CPI-8.

TIPO DE DEFECTO	CAUSA DEL DEFECTO	MEDIDA PREVENTIVA
Agujeros y discontinuidades en el fuste del pilote asociados con bulbos cerca del agujero o cerca de cavidades.	Sobre excavación en terreno inestable.	1.- Avance de la entubación provisional por delante del bucket o la hélice, (CPI-4). 2.- Utilización de fluidos de estabilización, (CPI-6). 3.- Utilización de entubación perdida, (CPI-5).
Parte del terreno embebido en el hormigón, cerca de la cabeza del pilote.	Sobre excavación cerca de la superficie, produciendo una rápida pérdida de hormigón al retirar completamente el entubado	Avance de la entubación provisional por delante del bucket o la hélice, (CPI-4).
Material suelto en la base del pilote.	Caída de fragmentos y terreno suelto de las paredes de la perforación, a veces debido al retraso en el suministro del hormigón o por la misma inestabilidad del sustrato.	1.- Suministro y puesta en obra del hormigón lo más rápido posible. 2.- Entubación provisional, (CPI-4). 3.- Utilización de fluidos de estabilización, (CPI-6). 4.- En todos los casos limpieza del fondo mediante "air-lifting" y/o mediante bucket.
Material suelto embebido en el pilote.	Falta de cuidado o de entubación provisional en la superficie del pilote.	Colocación de entubación provisional en la superficie del pilote, a modo de murete-guía.
Disminución local de la sección del pilote, asociada con bulbos a mayores profundidades.	Confinamiento insuficiente del hormigón.	1.- Extracción lenta y cuidadosa del entubado. 2.- Utilización de entubación perdida, (CPI-5).
Disminución local de la sección del pilote, no se producen bulbos a mayores profundidades.	Carga hidrostática del hormigón durante la extracción del entubado.	Altura adecuada del hormigón en la entubación.
Discontinuidades en el fuste del pilote, principalmente por inclusiones del terreno.	Baja trabajabilidad del hormigón o fraguado demasiado rápido o tiempo excesivo entre fabricación del hormigón y extracción del entubado.	1.- Utilización de hormigones con una dosificación adecuada. 2.- Cuidado especial ante elevadas temperaturas. 3.- Correcta planificación en el servicio de hormigón y utilización de retardantes.
Falta de hormigón por el exterior de la armadura.	Armadura demasiado densa para el paso del hormigón. Hormigón de baja trabajabilidad.	1.- Utilización de mayor sección de armadura en las barras preferiblemente a un mayor número pero con menor espaciamiento entre ellas. 2.- Correcta dosificación del hormigón.
Discontinuidad en el fuste del pilote (normalmente, separación total en el hormigón).	Hormigón de baja trabajabilidad.	1.- Correcta dosificación del hormigón. 2.- Minimizar el tiempo en el suministro del hormigón.
Dilución del hormigón y formación de zonas blandas.	Penetración de agua en el pilote debido a una dosificación del hormigón inadecuada.	Correcta dosificación del hormigón.
Inclusión de fragmentos arcillosos en el pilote.	Restos arcillosos adheridos a la entubación, desplazados por el hormigón viscoso e incorporados en el cuerpo del pilote.	Utilización de entubación limpia.
Segregación del hormigón con dilución del cemento, a veces con aparición de arena y grava en el cuerpo del pilote.	Ascenso de la tubería de hormigonado por encima de la superficie del hormigón, accidentalmente o por obstrucción. Entrada importante de flujo de agua a través de estrato permeable.	1.- Correcto control y seguimiento de la longitud de tubería introducida en el hormigón. 2.- Correcta fluencia del hormigón a través de la tubería de hormigonado. 3.- Utilización de entubación perdida, (CPI-5).

Bibliografía:

- ADUVIRE, P.O. et al. (1997): "Manual de túneles y obras subterráneas". López G.C., Editor. Entorno Gráfico, Madrid, 1082 pp.
- BAKER, C. N. (1971): "Caisson construction problems and correction in Chicago". Journal of the soil mechanics and foundations division. Proceedings of the American society of civil engineers, 417-440.

- BEER, G. (2006): "Technology innovation in underground construction". Institute for structural analysis, TU Graz, Austria.
- BROWN, D.A. (2004): "Zen and the art of drilled shaft construction: the pursuit of quality". Geotechnical special publication n° 124, ASCE. Geo-institute international conference on drilled foundations. Orlando. 15 pp.
- FLEMING, W.K. et al. (1977): "The use and influence of ben-

Cimentación

- tonite in bored pile construction". *PSA Civil Engineering technical guide* n° 8. CIRIA, London, 93 pp.
- FLEMING, W.K. (1995): "The understanding of continuous flight auger piling, its monitoring and control". *Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotech. Engng.*, 113, 157-165.
 - FLEMING, W.K. et al. (2008): "Piling engineering". Taylor & Francis Publishers, London and New York, 398 pp.
 - HOBBS, N.B. (1957): "Unusual necking of cast-in-situ concrete piles". *Proceedings of the fourth international conference on soil mechanics and foundation engineering*. London. Vol. II, 40-42.
 - LIKINS, G. et al. (2000): "Construction control for augercast piling". *Conference proceeding paper. Technological and design developments in deep foundations (GSP 100)*, Denver, Colorado, 447-457.
 - LIU, H. et al. (2009): "Construction of a large diameter cast-in-situ concrete pipe pile for ground improvement". *Advances in ground improvement. Proceedings of the US-China workshop on ground improvement technologies*. N° 188, 120-129.
 - MITCHEL, J.K. (1970): "In place treatment of foundation soils". *ASCE Journal of the soil mechanics and foundation division* (96) 1.
 - MOH, Z.C. (1994): "Current deep foundation practice in Taiwan and southeast Asia, *International conference on design and construction of deep foundations*, Orlando, Florida, 236-259.
 - NUÑEZ, B.D. (2007): "Lodos tixotrópicos en cimentaciones profundas". *Ingeniería del terreno. U.D. Proyectos E.T.S.I. Minas. UPM*. Vol. 10, capítulo 8, 261-274.
 - O'NEILL, M.W. (1991): "Construction practices and defects in drilled shafts". *Transportation Research Record* N° 1331. *Integrity testing of foundations*, 6-14.
 - POULOS, H. G. (1997): "Behaviour of pile groups with defective piles". *Proc. 14 th int. conf. soil mechanics foundation engineering*, Hamburg, 2, 871-876.
 - POULOS, H. G. (2005): "Pile behavior-consequences of geological and construction imperfections". *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. Vol. 131, Issue 5, 538-563.
 - TCHEPACK, S. (2000): "The need for pile testing". *Statnamic loading test '98*, Kusakabe, Kuwabara & Matsumoto (eds), Balkema, Rotterdam.
 - THORBURN, S. et al. (1977): "Review of problems associated with the construction of cast-in-place concrete piles". *PSA Civil Engineering technical guide* n° 6. CIRIA, London, 42 pp.
 - THORBURN, S. et al. (1993): "The response of sands to the construction of continuous flight auger piles". *Deep foundations on bored and auger piles*, Rotterdam, 429-443.
 - VAN WEELE, A.F. (1988): "Cast-in-situ piles-Installation methods, soil disturbance and resulting pile behavior". *Deep foundations on bored auger piles*, Rotterdam, 219-226.
 - XANTHAKOS, P.P., et al. (1.994): "Ground control and improvement". *John Wiley & Sons, Inc. New York*, 910 pp.