

Diseño y pruebas de pilotes prefabricados hincados

Carlos Fernández Tadeo, CFT & Asociados, S.L.

Los pilotes de hormigón prefabricados e hincados son una buena opción para las cimentaciones de estructuras en suelos blandos o sueltos. En los últimos años, su utilización no se ha visto muy afectada por la drástica reducción de actividad sufrida en la construcción, que si ha afectado a otros métodos de pilotaje. Probablemente ello es debido a que ofrecen un precio muy competitivo y a que su ejecución es muy rápida y limpia.

La instalación de pilotes mediante hinca es el método más antiguo de construcción de pilotes. Durante milenios se hincaron solo pilotes de madera, pero ahora son predominantemente de hormigón (armado o pretensado) y de acero (tubos o perfiles). La tecnificación creciente de la construcción llegó hace décadas a la hinca de pilotes, que se ha convertido en una actividad de alta productividad, al conjugar prefabricación en taller y mecanización de la puesta en obra. Los pilotes se prefabrican en un proceso industrial, se transportan a obra, y allí se instalan con maquinaria especializada que es operada por solo dos personas.

Precisamente debido a esa alta tecnificación, la construcción de pilotes hincados se ha convertido en una actividad especializada que ejecutan muy pocas empresas en España y que pocos consultores geotécnicos dominan. En CFT & Asociados fuimos conscientes, hace ya más de una década, de la necesidad existente en la comunidad geotécnica de disponer de expertos y de métodos de ensayo independientes, por lo que iniciamos un camino largo y escondido, pero lleno de satisfacciones, que ha pasado por la formación de nuestro personal, por la cooperación con expertos internacionales, y por la obtención de equipos y software especializados para el proyecto y el ensayo de los pilotes hincados. En este camino hemos aprendido mucho y hemos ayudado a nuestros clientes a optimizar sus cimentaciones mediante pilotes hincados, a probar su capacidad de carga y a controlar la calidad de su ejecución.

Fase de proyecto

Como en todos los proyectos de cimentaciones, es fundamental realizar un buen reconocimiento del subsuelo. Los ahorros que



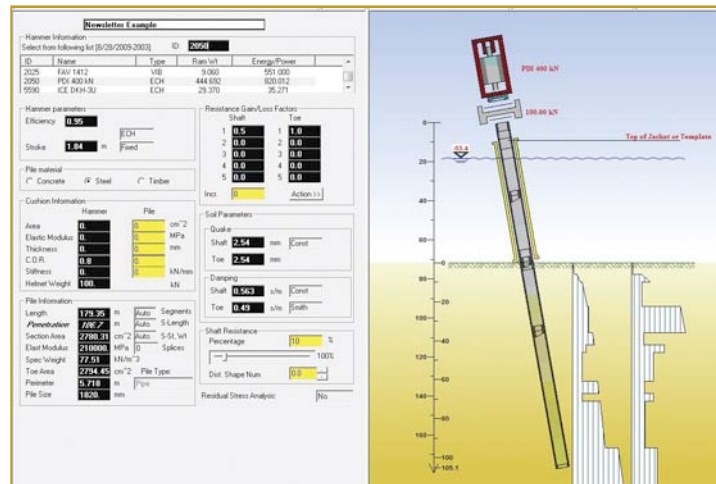
I. Hinca de pilote prefabricado.

en estos casos genera el disponer de un buen estudio geotécnico suelen ser importantes, ya que se puede afinar mucho más en el cálculo y diseño del pilotaje. Por desgracia, todavía se encuentran casos de reconocimientos poco profundos que ni siquiera alcanzan la longitud de pilote recomendada, faltos de ensayos de campo (SPT, piezocono, etc.), con pocos ensayos de laboratorio, y con recomendaciones poco justificadas.

En general, el diseño del pilotaje hincado no es de gran complejidad, si se dispone de un buen estudio geotécnico y se siguen los criterios de normas y códigos reconocidos, como el Código Técnico de la Edificación CTE DB-SE C: Cimientos, la Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras del Ministerio de Fomento, y la ROM 0.5-05 de Puertos del Estado. También son de ayuda los programas informáticos especializados en diseño de cimentaciones, algunos de ellos gratuitos como el programa Driven de la FWHA (USA), que se puede obtener en nuestra web <http://www.fernandeztadeo.com/soft.htm>.

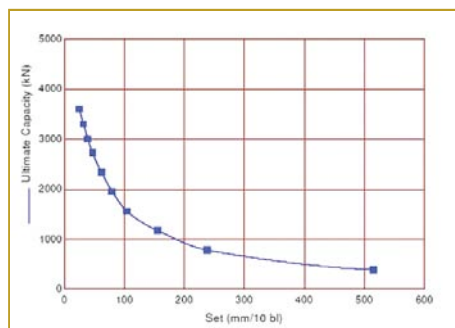
Sin embargo, todavía en muchos casos se sigue el criterio, que sugieren a veces las empresas especializadas de pilotes hincados, de que el único método de diseño posible es cargar el pilote en fase de proyecto a su tope estructural y luego en obra hincarlo hasta que dé "rechazo" según alguna fórmula semiempírica, que normalmente tiene más de 100 años. Esta manera de proyectar y construir puede llevar a problemas en la ejecución, como: longitudes de pilote diferentes de las que cabría esperar según el estudio geotécnico y los cálculos de capacidad, descontrol presupuestario consiguiente, inseguridad sobre la capacidad real de carga de los pilotes, modificaciones del proyecto de encepados y estructura, y otros similares.

La creciente complejidad de las cimentaciones profundas, impulsada en gran parte por el auge de las construcciones en medio "off-shore" (plataformas petrolíferas, aerogeneradores marinos, etc), está haciendo nacer nuevos y sofisticados métodos de diseño de los pilotajes, como el método británico "Imperial College Pile design method" (ICP). Por otro lado, el proceso de convergencia de tecnologías en la Unión Europea, cuyo objeto es facilitar la libre competencia entre empresas de todos los países del continente, está creando nuevas normativas técnicas como los



2. Pantalla de entrada de datos del programa GRLWEAP.

Eurocódigos de construcción. El Eurocódigo 7 "Proyecto Geotécnico" desarrolla los temas de proyecto y construcción de obras de ámbito geotécnico. En España fue publicado por Aenor como norma no obligatoria con referencia UNE-ENV 1997-1. Existe ya una propuesta de Anejo Nacional Español del EC7, que probablemente será aprobada por Aenor próximamente, y que será previsiblemente refrendado por decreto del Ministerio de Fomento en el BOE, lo que convertirá al EC7 y a su Anejo Nacional en norma obligatoria en nuestro país. La creciente internacionalización de la actividad de nuestras constructoras y consultoras hace que muchas de ellas estén trabajando en otros países europeos en los que el EC7 ya está plenamente en vigor, propiciando así que el EC7 se haya empezado a utilizar también en España. En lo que se requiere al diseño de pilotes, el EC7 prioriza el diseño en base a pruebas de carga sobre otros métodos de cálculo clásicos basados en fórmulas analíticas. Por todo ello, es de prever que en los próximos años sea necesario incrementar el número de empresas e ingenieros especialistas en pruebas de carga de pilotes, para poder atender la creciente demanda que se generará.



3. Curva de hincá obtenida con GRLWEAP.

Método de dimensionado	Convencional (1)	Pruebas de carga (2)
Carga persistente o transitoria	3,0	2,0
Carga extraordinaria	2,0	1,5

Tabla I

(1) Métodos de cálculo basados en ensayos de campo o fórmulas analíticas (largo plazo).

(2) Métodos de cálculo basados en fórmulas analíticas (corto plazo), métodos basados en pruebas de carga hasta rotura y métodos basados en pruebas dinámicas de hinca con control electrónico de la hinca y contraste con pruebas de carga.

Algunos de los códigos españoles más modernos, como el CTE y la ROM 0.5-05 de Puertos del Estado, ya incluyen criterios para calcular los pilotes hincados teniendo en cuenta coeficientes de seguridad diferentes en función del método de cálculo utilizado y de los controles que se hagan en obra. En su artículo 2.4 el CTE DB-SE C describe los coeficientes de seguridad generales que se deben utilizar en el proyecto geotécnico. En lo referente a pilotes, indica los coeficientes parciales γ_R de minoración de la resistencia del terreno al hundimiento que figuran en la Tabla I.

A la vista de esta tabla, resulta evidente la gran ventaja económica que puede suponer la utilización de pruebas de carga en un proyecto en el que el haya un número significativo de pilotes, incluso antes de que entre en vigor el EC7 en España.

Fase de contratación de la empresa de pilotaje

La selección de una empresa especializada en la construcción e hinca de pilotes prefabricados de hormigón armado es bastante sencilla, ya

que hay muy pocas empresas en España que trabajen con este tipo de pilote, y las que hay son grandes y solventes. Lo que resulta importante es conocer los requisitos técnicos y de control que se deben exigir en la contratación, que pueden resumirse a continuación.

1. Descripción completa de la tipología de pilotaje ofertada, características, juntas entre tramos prefabricados, sistema de hinca, etc. A ser posible avalada por reconocimientos oficiales del sistema tipo DITE o similar.
2. Justificación de que con la maquinaria de hinca que se va a utilizar se podrán alcanzar las profundidades especificadas en el proyecto, sin quedarse cortos los pilotes, ni resultar dañados por exceso de hinca. Esta justificación debe hacerse mediante programas de ordenador que utilicen la teoría de la ecuación de la onda, ya que el impacto del martillo se propaga a lo largo del pilote como una onda de choque. Los más utilizados internacionalmente son GRLWEAP y TNOWAVE.
3. Presentación de las curvas de hinca para cada tipo de pilote y martillo a utilizar. Estas curvas relacionan gráficamente la resistencia a la hinca y el "rechazo" o penetración para un determinado número de golpes, y permiten tener previsto a priori cuál es el momento en que debe detenerse la hinca, siempre que estemos en la longitud y el estrato de suelo previstos en proyecto. Estas curvas de hinca se pueden obtener de fórmulas semiempíricas antiguas como la de Hiley o la holandesa, pero hoy día es más recomendable utilizar los mismos programas de ordenador citados antes, que se basan en el método más preciso de la ecuación de la onda.
4. Plan de control de calidad a implantar en la ejecución, tanto en la fase de prefabricación de pilotes en planta como en la de hinca en



4. Prueba de carga dinámica.

obra. Deben incluirse pruebas finales de ejecución mediante ensayos dinámicos y estáticos de carga. También pueden realizarse ensayos de integridad estructural por el método sónico con martillo de mano.

Fase de ejecución del pilotaje hincado

Es frecuente que en obra se realice una primera tanda de hincas de pilotes repartidos por toda la zona de trabajo, al objeto de zonificar el terreno y comprobar el diseño de proyecto. También es habitual que algunas de estas primeras hincas se controlen electrónicamente, mediante las denominadas pruebas de carga dinámica con analizador electrónico de hinca.

La prueba de carga dinámica de un pilote consiste básicamente en dejar caer una masa importante desde una cierta altura sobre la cabeza del pilote, aprovechando para ello el mismo martillo que está realizando la hinca. La cabeza del pilote se instrumenta mediante acelerómetros y extensímetros electrónicos, para captar la aceleración y la deformación generadas por la onda de impacto que desciende por el pilote, realizándose después cálculos en ordenador con la información obtenida. Se utilizan para ello modelos matemáticos que simulan el comportamiento del pilote y su interacción con el suelo por medio de la ecuación de la onda. Los programas más utilizados son CAPWAP y TNOWAVE.

Con estas pruebas se obtiene una estimación de capacidad de carga por fuste y por punta, así como una estimación de curva carga-asiento del pilote en comportamiento estático. La norma aplicable para el ensayo en obra es la ASTM D4945 "Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles". Este ensayo tiene una larga tradición de 40 años en pilotes hincados, y desde hace más de 20 años se utiliza también en pilotes "in situ". Los contratistas de pilotaje tienen equipos para realizar la toma de datos en obra, y también los programas de ordenador necesarios para el tratamiento de datos en oficina, realizando estas pruebas como autocontrol de calidad. El control de calidad externo, o control de recepción por parte del promotor o de la dirección de obra, se realiza mediante la intervención de consultores especializados independientes, que disponen de

equipos de toma de datos y de software informático propio. En este caso es necesario prever que el contratista facilite su martillo de hinca para la realización de las pruebas.

Es habitual dejar pasar una o varias semanas desde la hinca hasta la realización de la prueba de carga dinámica, ya que las características resistentes del terreno van aumentando con el paso del tiempo. Al finalizar la hinca, el terreno alrededor del pilote está alterado y no tiene tanta capacidad de carga como después de un tiempo suficiente para que el suelo alrededor del pilote vuelva a consolidarse. Este efecto es más importante en suelos arcillosos y menos en suelos arenosos.

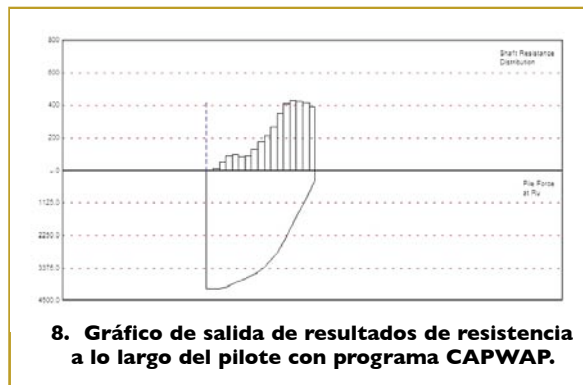
El Código Técnico de la Edificación especifica



5. Equipo analizador de hinca.



6. Sensores electrónicos sujetos al pilote.



estas pruebas en algunos casos. En su artículo 5.4.4, dedicado a los ensayos de pilotes, el CTE DB-SE C: "Cimientos" considera necesario realizar pruebas de carga dinámica en los pilotes prefabricados hincados utilizados en la cimentación de edificios de categorías C-3 y C-4, que corresponden a las construcciones de más de 10 plantas, sin contar los sótanos, y a los conjuntos monumentales o singulares.

El ensayo de integridad estructural que se realiza en los pilotes hincados utiliza el método sónico con martillo de mano, también conocido como de "impedancia mecánica". Consiste en generar una onda sónica mediante un martillo de mano que golpea la cabeza del pilote. Esta onda es reflejada por las discontinuidades del pilote, por su punta, o por cambios de sección o variaciones del terreno que lo rodea. Los movimientos consiguientes de la cabeza del pilote son captados por un acelerómetro, que envía los resultados a un ordenador portátil. En un ensayo normal, en la pantalla del ordenador aparece una curva de velocidades con dos picos, el primero es el impacto del martillo y el segundo el reflejo de la onda en la punta del pilote a la profundidad esperada. Si hubiera algún fallo en el pilote hincado, la onda rebotaría antes en la zona de rotura y quedaría marcado un pico en la gráfica a esa profundidad. En

pilotes largos en arenas o en suelos flojos en los que su esbeltez (relación longitud/diámetro) sea mayor que 30 ó 40 es difícil detectar el rebote de la onda sónica en la punta, ya que la señal se suele perder, aunque sí se pueden detectar defectos en la parte superior del pilote. En pilotes en arcilla y suelos duros el alcance es inferior, del orden de 15 ó 20 diámetros, ya que la arcilla se adhiere mucho al pilote, lo que favorece la dispersión de la onda sónica hacia el terreno y dificulta la detección de la punta. También puede suceder que la onda rebote en una junta de unión entre elementos de un pilote largo. En cuanto al momento de hacer el ensayo, sucede lo contrario que con las pruebas de carga dinámica, ya que no interesa que el terreno se adhiera mucho al pilote para que la onda sónica no se disperse, por lo que deben hacerse cuanto antes tras la hinca.

La hinca de pilotes genera vibraciones en el suelo. El control de esas vibraciones es fundamental para poder estimar sus posibles efectos perjudiciales en las construcciones que se encuentren dentro de un cierto radio de influencia. En el caso de las vibraciones producidas por voladuras, su control es obligatorio y forma parte de la rutina del trabajo. Pero no pasa lo mismo en el caso de la hinca de pilotes, donde el control de las vibraciones inducidas en las construcciones vecinas es recomendable para mantenerlas dentro de valores admisibles, evitándose así las reclamaciones de los vecinos afectados, que pueden dar origen a paradas imprevistas de los trabajos y a retrasos en el programa de ejecución, con los perjuicios económicos consiguientes.

Ventajas de realizar un buen diseño y un buen control del pilotaje hincado

- Reducción o eliminación de incertidumbres de proyecto: ¿Cual es la longitud adecuada de pilote en el subsuelo local para conseguir la resistencia necesaria? ¿Se podrán hincar hasta la profundidad necesaria con la maquinaria disponible?
- Garantía de cumplimiento de plazos de ejecución, al minimizarse las paradas por circunstancias imprevistas. Un caso frecuente es que los pilotes se hinquen hasta rechazo a una profundidad muy superior a la prevista

inicialmente en los cálculos, lo que produce paros en la producción hasta que se estudie el caso y se adopte una decisión. Lo mismo puede ocurrir en el caso contrario, cuando los pilotes alcancen el rechazo a profundidad inferior a la esperada.

- Mayor control presupuestario, al evitarse sorpresas en la longitud hincada de pilote a la hora de la ejecución.
- Reducción de costes: los códigos técnicos permiten utilizar en los cálculos unos coeficientes de seguridad más bajos cuando se realizan pruebas de carga, lo que permite abaratar la cimentación.
- Mejor control de calidad realizando pruebas de carga de los pilotes, ya que se obtiene una comprobación de su capacidad resistente real.
- Reducción de conflictos externos: el control de las vibraciones producidas por la hincada permite comprobar si se está sometiendo a las estructuras vecinas a movimientos excesivos, evitándose reclamaciones y litigios por este motivo.

Bibliografía

- Ministerio de Fomento, Dirección General de Carreteras. PG3 art. 670 "Cimentaciones por pilotes hincados a percusión". Redacción dada en la O.C. 1382/02.

- Ministerio de Fomento, Dirección General de Carreteras. "Guía de cimentaciones en obras de carreteras". Madrid, 2003.
- Ministerio de la Vivienda. "Código Técnico de la Edificación, Documento Básico SE-C Cimentaciones". Madrid, 2006.
- Puertos del Estado. "Recomendaciones geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias". ROM 0.5-05.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. "Realización de trabajos geotécnicos especiales. Pilotes de desplazamiento". UNE-EN 12699:2001.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. "Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales". UNE-EN 1997-1:2010.
- American Society For Testing and Materials. "Test Method for High Strain Dynamic Testing of Piles". ASTM D4945.
- Rausche, F., Goble, G. G. and Likins, G. E. (1985). "Dynamic Determination of Pile Capacity". ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111, No. 3: Reston, VA, pp.367-383.
- Sánchez Domínguez, F. y otros. "Recomendaciones para la ejecución e interpretación de ensayos de integridad de pilotes y pantallas 'in situ' ". Laboratorio de Geotecnia del Cedex, Ministerio de Fomento, 2006.
- Jardine, R. y otros. "ICP Design Methods for driven piles in sands and clays". Londres, 2005.