

Los ensayos de integridad estructural de pilotes: 20 años de experiencia en España*

Los ensayos de integridad estructural de pilotes suministran informaciones sobre las dimensiones físicas, la continuidad o la consistencia de los materiales empleados en los pilotes. Son dos los métodos más utilizados: a) El *método sónico* mediante martillo de mano, que genera una onda sónica que desciende por el fuste del pilote, rebota en la punta y es captada por un acelerómetro. b) El *método de cross-hole ultrasónico*, que consiste en hacer descender un emisor y un receptor de ultrasonidos por dos tubos paralelos en el interior del pilote, registrándose el tiempo que tarda la onda en recorrer la distancia entre ambos. El incremento de la demanda de estos ensayos ha provocado que estos salgan del ámbito de unos pocos especialistas para entrar de lleno en el abanico de servicios de los laboratorios generalistas de ensayos de materiales de construcción. En el presente artículo se indican los posibles fallos en la construcción de pilotes, se describen los fundamentos físicos de los dos métodos de ensayo citados, y se dan criterios para la interpretación de los resultados.

Los ensayos de integridad de pilotes suministran informaciones sobre las dimensiones físicas, la continuidad o la consistencia de los materiales empleados en los pilotes, y no suministran información directa sobre el comportamiento de los pilotes en condiciones de carga.

Estos ensayos no pretenden reemplazar a las pruebas de carga de pilotes, sino que constituyen una fuente adicional de información sobre los pilotes construidos. Significan una potente herramienta de trabajo para poder determinar experimentalmente la existencia de fallos en los pilotes con rapidez y economía, por lo que son utilizados básicamente como control de calidad generalizado de los pilotes.

Los resultados de los ensayos de integridad necesitan ser interpretados por personal experimentado. Las modernas técnicas electrónicas e informáticas permiten un procesamiento y un tratamiento de las señales que facilitan la posterior presentación e interpretación de los resultados. No se puede esperar que los ensayos de integridad identifiquen todas las imperfecciones existentes en un pilote, pero son una potente herramienta como salvaguardia contra defectos importantes. Los ensayos de integridad pueden identificar fallos de menor importancia que no comprometan la capacidad de carga o la durabilidad del pilote, por lo que resulta fundamental la experiencia del ingeniero responsable de su interpretación.

Las pruebas de carga permiten conocer el comportamiento real de los pilotes en el terreno, sometidos a cargas generalmente superiores a las de servicio. Se realizan en la fase de proyecto de la cimentación, o en la fase de construcción, como comprobación del diseño realizado. Dadas las elevadas cargas a aplicar, usualmente del orden de cientos o miles de toneladas, son

Palabras clave: CONTROL DE CALIDAD, INTEGRIDAD ESTRUCTURAL, MÉTODO SÓNICO, PILOTES, ULTRASONIDOS.

C. FERNÁNDEZ TADEO, I.C.C. y P. Director de CFT&Asociados, S.L.

ensayos muy costosos, por lo que la tendencia es a realizarlos cada vez menos y solo en obras de elevado presupuesto. Los modernos ensayos dinámicos y rápidos de carga, de coste muy inferior, permiten la realización de pruebas de carga en obras de presupuestos medios, que se benefician así también del diseño más ajustado que admiten las normas cuando se realizan ensayos de carga. En el presente artículo no se tratan las pruebas de carga de pilotes.

Fallos en la construcción de pilotes

La construcción de pilotes es muy sensible a los métodos de construcción deficientes. Se utilizan tecnologías complejas, que habitualmente resultan imprescindibles para que el elemento estructural de hormigón armado quede bien construido sin fallos. Pero si no se utilizan las tecnologías apropiadas, la aparición de fa-

llos en el pilote está asegurada, como demuestra la experiencia.

Sin embargo, no basta con utilizar tecnologías adecuadas para garantizar un pilote sin fallos, ya que todo el proceso constructivo se hace de manera oculta y generalmente no es posible realizar comprobaciones visuales del estado de la estructura enterrada, al contrario que en las estructuras de puentes o de edificios.

Los fallos que pueden aparecer en un pilote son variados y de múltiple origen. En pilotes construidos con barrena continua pueden producirse fallos cuando la velocidad de extracción de la barrena es excesiva y no da tiempo a que el hormigón bombeado rellene el hueco de la perforación. En pilotes perforados en terreno arenoso y con agua, son frecuentes los bulbos y los estrechamientos si las camisas metálicas provisionales no son convenientemente manejadas. El fondo de la perforación puede acumular sedimentos y detritus, difíciles de eliminar una vez iniciado el hormigonado. El empleo de lodos de sostenimiento de manera poco cuidadosa puede provocar fallos por sedimentación de arenas. La extracción de camisas metálicas de sostenimiento temporal puede provocar arrastres del hormigón hacia arriba. El empleo de hormigón de poca calidad puede producir atascos en los tubos de colocación y huecos en el pilote.

Métodos de ensayo de integridad estructural de pilotes

Los métodos de ensayo de integridad estructural de pilotes más utilizados internacionalmente son dos: el *método sónico* y el *método ultrasónico "cross-hole"*.

Método sónico

Consiste en golpear la cabeza del pilote con un martillo de mano y obtener mediante instrumentación el movimiento de la cabeza del pilote como consecuencia de la onda de tensión generada (Fig. 1). La onda generada es reflejada por la punta del pilote, por variaciones del



Los ensayos de integridad de pilotes permiten determinar fallos en los mismos.

(*) El presente artículo ha sido presentado como ponencia en el XII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV Congreso de Control de Calidad en la Construcción CONPAT-Colombia.

terreno que rodea el pilote y por discontinuidades o fallos existentes en el mismo. La onda sónica es captada por un acelerómetro y luego amplificada y digitalizada por un sistema electrónico y convertida en medida de velocidad, que se presenta inmediatamente en la pantalla de un computador portátil. La curva obtenida se puede archivar en el equipo para su posterior tratamiento e impresión mediante impresora.

El gráfico de velocidad de un pilote continuo aparece en la pantalla como una línea relativamente recta con dos picos (Fig. 2). El primero de ellos es el causado por el impacto del martillo, mientras que el segundo es causado por la reflexión en la punta del pilote. El programa informático incorpora diferentes técnicas para mejorar y explotar las señales obtenidas, tales como suavizar y promediar los golpes de martillo, la obtención de la curva media de varios pilotes, y la amplificación de la señal con la profundidad de manera lineal o exponencial para compensar los efectos de pérdida de señal con la profundidad.

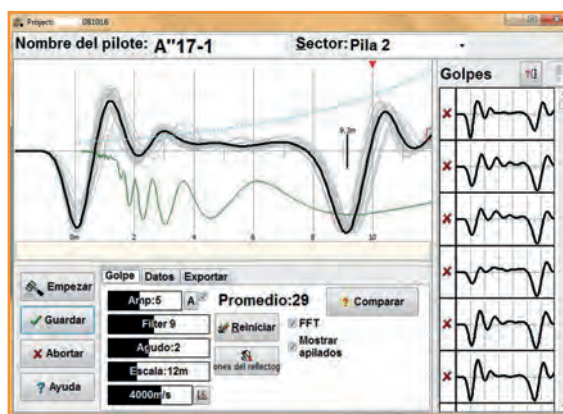
Los pilotes no requieren ninguna preparación especial, únicamente se necesita que se haya realizado ya el descabezado en el momento del ensayo, para que el golpe del martillo se realice sobre hormigón sano y la onda no sea reflejada por discontinuidades o coqueas del hormigón poco compacto existente en la cabeza del pilote antes del descabezado. La edad mínima del hormigón en el momento del ensayo es de siete días, para garantizar un grado de endurecimiento y un módulo de elasticidad que permitan que la onda se propague. En ocasiones se ha conseguido obtener buenas señales a edades incluso más tempranas. Los ensayos no producen ninguna interferencia en la marcha de la obra, ya que se pueden ensayar grupos de pilotes a medida que se van construyendo y descabezando. El rendimiento es elevado, y en condiciones óptimas se pueden ensayar más de 100 pilotes al día.

Se trata de un método dinámico que induce una baja deformación en el pilote, denominándose generalmente *método sónico*, aunque también se le nombra como: *sísmico*, *ensayo de integridad de baja deformación*, *sonic echo* (en inglés) o *ensayo de impedancia mecánica*. Se puede aplicar a cualquier tipo de pilote, no requiere ninguna preparación especial en el mismo, ni necesita equipo pesado, por lo que resulta económico y de gran rendimiento.

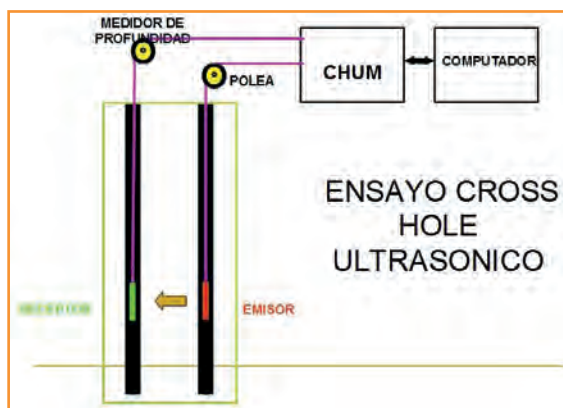
Dado que el porcentaje estadístico de fallos en pilotes es reducido, se debe ensayar el 100% de los pilotes de la obra si se quiere tener eficacia completa en la detec-



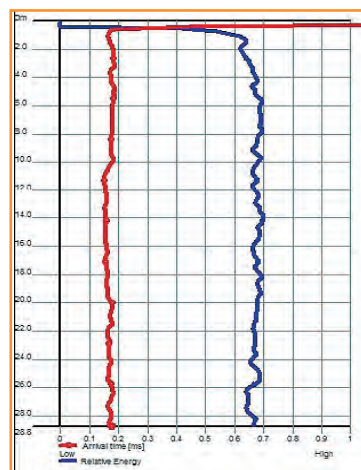
■ [Fig. 1].- Ensayo sónico de un pilote.



■ [Fig. 2].- Ventana de datos del programa Pet.



■ [Fig. 3].- Esquema de ensayo ultrasónico.



■ [Figura 4].- Gráfico de ensayo ultrasónico.

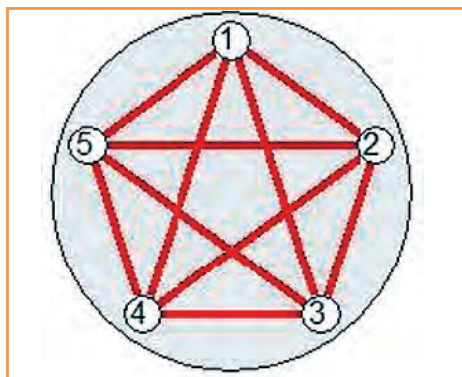
ción de fallos. En el caso de que la Dirección de Obra admitiese una reducción del muestreo, este debe ser del 30% como mínimo, aunque se corre el riesgo de detectar solo fallos generalizados y no fallos puntuales, que son los habituales. En el caso de realizarse ensayos en la totalidad de los pilotes o en un muestreo significativo, las cargas admisibles por razón estructural en los pilotes se pueden incrementar en un 25%, de acuerdo con el *Código Técnico de la Edificación español* [8].

Método ultrasónico cross-hole

El método se basa en registrar el tiempo que tarda una onda ultrasónica en propagarse desde un emisor a un receptor que se desplazan simultáneamente por dos tubos paralelos sujetos a la armadura del pilote. El tiempo medido es función de la distancia entre el emisor y el receptor y de las características del medio atravesado.

En el caso de existir defectos en el camino de las ondas tales como inclusiones de tierra, oqueadas, coqueas u otros que hagan alargar el tiempo de recorrido, en la gráfica del ensayo queda reflejada la variación y la profundidad a que se ha producido. Los datos son almacenados de manera digital en el equipo, y las gráficas pueden ser impresas directamente en la obra o revisadas e impresas en gabinete. En la Fig. 3 se puede ver un esquema de funcionamiento, y en la Fig. 4 unas gráficas típicas de tiempo de llegada y energía de la onda ultrasónica.

Para la realización del ensayo el constructor deja instalados en el pilote unos tubos para poder introducir las sondas hasta la profundidad que se quiere ensayar. Estos tubos son preferentemente de acero, con diámetro mínimo 40 mm y preferiblemente 50 mm. Se pueden emplear tubos de plástico en pilotes cortos, pero es muy fácil que se deterioren durante el hormigonado y queden inservibles, y que se produzcan despegues del hormigón que impidan el paso de la onda ultrasónica. Los empalmes se realizan con manguitos roscados, ya que las uniones soldadas pueden producir rebabas que dificulten el paso de las sondas o deterioren los cables. Los extremos inferiores se cierran herméticamente por medio de tapones metálicos, para impedir la entrada de elementos extraños y para evitar la pérdida del agua que deben contener durante el ensayo. Los extremos superiores también se cierran para evitar la caída accidental de material hasta el momento de realización del ensayo. Los tubos sobresalen al menos 40 cm del hormigón del pilote y se



■ [Fig. 5]. - Esquema de distribución con 5 tubos.

llenar de agua dulce limpia previamente al ensayo, comprobándose que no tienen obstrucciones, ni se producen pérdidas de agua. La regla general aproximada es un tubo cada 0,3 m de diámetro (Fig. 5).

En módulos de pantalla o *barrettes*, los tubos se colocan en ambas caras, alternados al tresbolillo, con separación entre tubos de una misma cara no superior a 1,1 m. El hormigón no tiene, en general, menos de una semana en el momento del ensayo. Es recomendable disponer de un plano con la identificación de los pilotes, su longitud aproximada, e información sobre posibles incidencias durante su construcción. En condiciones óptimas, se pueden realizar más de 300 m de ensayo a la hora.

Criterios de interpretación de resultados

Anomalías, fallos y defectos

Los ensayos de integridad de pilotes se realizan porque es frecuente que se produzcan fallos durante su construcción, que suelen quedar ocultos por la propia naturaleza de las cimentaciones profundas. Las modernas tecnologías sónicas y ultrasónicas permiten detectar la mayoría de esos fallos no visibles. Los informes de estos ensayos suelen decir que se ha encontrado una *anomalía* o que el pilote tiene un *defecto*. Pero debemos profundizar más en el significado de estas palabras.

La Monografía del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Cedex) del Ministerio de Fomento de España titulada: *Recomendaciones para la ejecución e interpretación de ensayos de integridad de pilotes y pantallas in situ* [11] distingue tres conceptos, adoptados también por la norma ASTM D 6760 [2]. El primero es el de *anomalía* (*anomaly*, en inglés). *Anomalía* es una desviación de la forma normal de la gráfica de ensayo. Usualmente quiere decir que las ondas sónicas o ultrasónicas han encontrado un obstáculo por la presencia de algo que no es hormigón normal. Pero también la anomalía podría estar producida por un mal funcionamiento del equipo electrónico, del *software*, o de la instrumentación asociada al ensayo.

El segundo concepto es el de *fallo* (*flaw*, en inglés). *Fallo* es una variación no esperada en las características físicas del pilote. Usualmente quiere decir que el pilote no ha quedado construido como se esperaba: tiene algún fallo. El tercer concepto es el de *defecto* (*defect*, en inglés). *Defecto* es una reducción en las propiedades resistentes y estructurales de la cimentación profunda en su conjunto. Hay fallos que pueden no ser defectos, porque no afectan a las propiedades resistentes de la cimentación, o porque la afectan de manera tan ligera que los coeficientes de seguridad globales siguen estando dentro de unos valores admisibles.

En el caso de detectarse *anomalías* mediante los ensayos de integridad, los responsables técnicos de la obra pueden recurrir a otros métodos para intentar investigar más en profundidad las causas, la naturaleza y la extensión del posible fallo, y determinar si el pilote es apto para el uso que se pretenda. Los métodos empleados tradicionalmente en estos casos son la excavación alrededor del pilote y los sondeos con extracción de testigo continuo del fuste del pilote. La realización de sondeos solo permite obtener datos del testigo extraído y de las paredes del sondeo, cuya posición con respecto al eje del pilote es difícil de conocer exactamente cuando la profundidad es grande.

Llegados a este punto, surge la pregunta de hasta dónde llega la misión del ensayador de pilotes. En esto hay coincidencia a nivel internacional entre todos los operadores: El informe de ensayo debe destacar las anomalías reseñables encontradas y debe indicar que tipo de fallo en el pilote puede haber generado esa anomalía en el ensayo, o por el contrario, si la anomalía no se considera originada por un fallo en el pilote sino por alguna circunstancia adversa del sistema de ensayo.

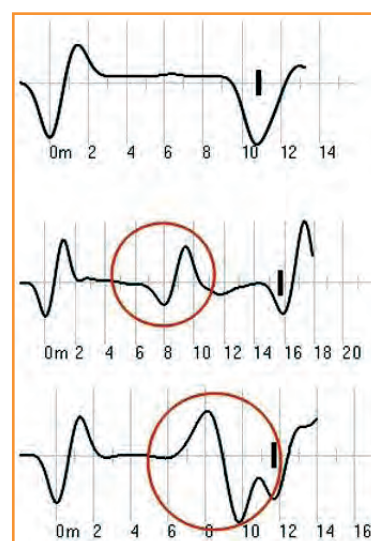
El informe de ensayo de integridad de un pilote no debería decir si el fallo detectado implica la existencia de un defecto en la cimentación, es decir, de una reducción en su capacidad de carga o en su durabilidad, ya que no es esa la misión del ensayador de pilotes, ni tiene los elementos y datos para hacerlo. Las evaluaciones y las decisiones técnicas son misión de otros actores en la construcción: proyectistas, directores de obra, supervisores, asistencias técnicas, responsables geotécnicos y estructurales, etc.

Ensayo sónico

Los pilotes que presentan reflexiones insignificantes de la onda sónica en puntos del fuste del pilote por encima de la punta y una clara reflexión de la onda en la punta, pueden ser considerados sin anomalías. Cuando no se aprecia una reflexión clara de la onda sónica en la punta, cosa que puede suceder en pilotes muy esbeltos, el ingeniero responsable establece hasta que profundidad el ensayo pue-

de considerarse significativo. En suelos arenosos y en suelos flojos el método sónico puede alcanzar una profundidad de 30 ó 40 veces el diámetro del pilote, pero en suelos arcillosos y en suelos duros el alcance es muy inferior, de solo 15 ó 20 veces el diámetro.

Si se aprecian reflexiones significativas o anomalías de la onda por encima de la punta del pilote, el ingeniero responsable del ensayo trata de dar una interpretación evaluando los posibles fallos en el pilote. La Fig. 6 contiene tres resultados típicos de ensayos sónicos: el primero corresponde a una gráfica sin anomalías, el segundo a una anomalía generada por un estrechamiento en el pilote, y el tercero a una anomalía generada por un ensanchamiento o bulbo en el pilote.



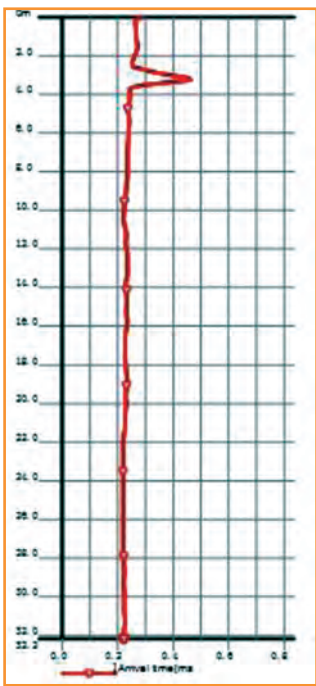
■ [Fig. 6]. - Gráficas típicas de ensayo sónico.

Es frecuente el caso de gráficas de ensayo complicadas, que no permiten llegar a una conclusión clara sobre la integridad del pilote ensayado. Algunas veces se consigue una mejora en el resultado descabezando algo más el pilote, pero otras no hay más opción que informar como ensayo de resultado incierto.

Ensayo ultrasónico "cross-hole"

Los pilotes que presentan unas gráficas de tiempo de llegada y de energía de la onda ultrasónica uniforme en toda su altura y en todos los perfiles ensayados pueden ser considerados como sin anomalías.

En el caso de que uno o varios perfiles entre parejas de tubos presenten retrasos significativos o pérdidas de señal a una o varias profundidades (Fig. 7), el ingeniero responsable del ensayo trata de dar una interpretación evaluando los posibles fallos existentes en el pilote. Es habitual considerar como anomalía un retraso de 20% o superior en la curva de tiempo de llegada de la onda. El número y posición de los perfiles que tienen una determinada anomalía a una misma profundidad puede dar una indicación de la zona en planta afectada.



[Figura 7].- Anomalía en ensayo ultrasónico.

Los ensayos de integridad de pilotes en España

El mercado de los ensayos de integridad de pilotes se ha consolidado en España en las dos últimas décadas. Ya no se concibe una construcción importante cimentada mediante pilotes en la que no se utilice alguno de los métodos de ensayo disponibles para comprobar la integridad estructural de los pilotes.

La práctica totalidad de los pilotes de gran diámetro de las estructuras de las nuevas líneas de ferrocarril de alta velocidad y de las nuevas carreteras y autopistas se está ensayando mediante la técnica de *cross-hole* ultrasónico a través de tubos embebidos en el hormigón del pilote. Es también cada vez mayor el número de pilotes de edificación que se ensaya mediante el método sónico, analizando las ondas sísmicas generadas por el golpe de un martillo de mano en la cabeza del pilote.

Los ensayos de integridad estructural de pilotes disminuyen el margen de incertidumbre existente en la construcción de cimentaciones profundas. Los códigos y normas geotécnicos más modernos, como la ROM 0.5-05 [10] y el CTE [8], admiten reducciones importantes de los coeficientes de seguridad empleados en el cálculo de pilotes en el caso de realizarse ensayos de este tipo, lo cual implica un abaratamiento de las cimentaciones en un grado muy superior al coste de los ensayos.

El incremento de la demanda de ensayos ha provocado que estos salgan del ámbito de unos pocos especialistas para entrar de lleno en el abanico de oferta de los laboratorios generalistas de ensayos de materiales de construcción. Sin embargo, a veces no se obtienen los niveles de calidad esperados, debido a que no siempre los equipos electrónicos empleados tienen un nivel tecnológico óptimo, y a que las personas que los utilizan o que interpretan sus resultados no disponen en algunos casos de la suficiente experiencia y preparación.

Los requisitos básicos para garantizar el éxito en los ensayos de integridad de pilotes son cuatro: a) Ensayos realizados por empresas consultoras o laboratorios independientes de los constructores. b) Equipos de ensayo con un adecuado nivel tecnológico, con el res-

paldo de centros internacionales de I+D de reconocido prestigio y experiencia. c) Operadores de campo con formación adecuada en el manejo de los equipos y en ingeniería geotécnica, siendo recomendable para ello disponer de una titulación universitaria en geología o ingeniería civil. d) Ingenieros Supervisores expertos en la realización e interpretación de los ensayos y con formación actualizada.

Poco a poco se han ido diferenciando los campos de aplicación de los dos métodos de ensayo por motivos que son muchas veces de tipo económico más que técnico. Los ensayos ultrasónicos *cross-hole* se realizan casi exclusivamente en pilotes de gran diámetro, debido a que la colocación de tubos embebidos y su mayor lentitud de ejecución los hace más caros. Por otro lado, el mayor coste de estos pilotes grandes hace que sea justificable utilizar este método, que permite localizar con gran precisión los posibles fallos en el pilote, que si no son detectados a tiempo pueden llegar a provocar daños en la estructura de difícil y costosa solución.

Los ensayos sónicos con martillo de mano son utilizados principalmente en el control de calidad generalizado de pilotes de diámetro medio y pequeño, hasta 1,0 m aproximadamente, en obras de edificación. Ello es debido por una parte a que su rendimiento es grande, y en este tipo de obras suele haber muchos pilotes, y por otra a que en estos pilotes los fallos suelen afectar a la sección completa del pilote y entonces su detección con este método es inmediata. El ensayo sónico no funciona bien en pilotes de gran diámetro (1,5 m o más) debido a que la longitud de la onda sónica, habitualmente comprendida entre 2 m y 3 m, empieza a ser parecida a la dimensión transversal del pilote, y entonces deja de ser válida una de las hipótesis matemáticas del método de la ecuación de la onda, al no ser el medio de propagación claramente unidimensional.

Los pilotes de gran diámetro en obras de ferrocarriles, carreteras y de edificación con grandes cargas se suelen ensayar al 100% mediante el método ultrasónico *cross-hole* en tubos embebidos en el hormigón del pilote, mientras que en obras de edificación con pilotes de diámetro pequeño o medio, se suele ensayar los pilotes por el método sónico con muestreo total, o también mediante una combinación de ambos métodos, un 10-20% de los pilotes por el método ultrasónico *cross-hole* y el resto por el método sónico.

Conclusiones

Los ensayos de integridad de pilotes constituyen una potente herramienta de trabajo para poder determinar experimentalmente la existencia de fallos en los pilotes y en las cimentaciones profundas. El método sónico con martillo de mano está siendo empleado en el control de pilotes de diámetro pequeño y medio, sin que sea precisa ninguna preparación especial del pilote ni interferir con la marcha de la obra, dada la sencillez y rapidez del ensayo y su economía. El método ultrasónico *cross-hole*

está siendo empleado en el control de pilotes de gran diámetro, siendo la única preparación previa necesaria el dejar tubos embebidos en el hormigón del pilote.

Los ensayos de integridad estructural de pilotes disminuyen el margen de incertidumbre existente en la construcción de cimentaciones profundas, por lo que los códigos y normas geotécnicos más modernos admiten reducciones de los coeficientes de seguridad empleados en los cálculos, lo cual implica un abaratamiento de las cimentaciones en un grado muy superior al coste de los ensayos.

La implantación de los ensayos de integridad de pilotes en una comunidad o mercado determinado requiere la existencia de consultores independientes y expertos, dotados de equipos de tecnología contrastada y de personal formado y entrenado en su empleo.

Agradecimientos

El autor desea agradecer a P. Meijer (TNO) y a J. Amir (Piletest) por su entusiasta ayuda y formación en las tecnologías de los ensayos de integridad de pilotes.

Bibliografía

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2007), *Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Piles*, ASTM D 5882-07, USA.
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2008), *Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing*, ASTM D 6760-08,
- [3] AMIR, E., AMIR, J. (2012), *Inferring pile shape from pulse-echo test records by evolutionary algorithm*, 9th International Conference on Testing and Design Methods for Deep Foundations, Kanazawa (Japón).
- [4] AMIR, E., AMIR, J. (2008), *Critical comparison of ultrasonic pile testing standards*, Stress Wave Conference, Lisboa.
- [5] DEEP FOUNDATIONS INSTITUTE (2005), *Manual for Non Destructive Testing and Evaluation of Drilled Shafts*, USA.
- [6] FERNÁNDEZ TADEO, C. (2010), *Los ensayos de integridad estructural de pilotes*. Jornada sobre Cimentaciones Especiales organizada por el Colegio de Geólogos, Barcelona.
- [7] FLEMING, K. Y OTROS (2009), *Piling Engineering*, Taylor & Francis, Londres.
- [8] MINISTERIO DE LA VIVIENDA (2006), *Código Técnico de la Edificación, Documento Básico SE-C Cimentaciones*, Madrid.
- [9] OTEO MAZO, C. (2008), *Algunas consideraciones sobre el diseño y construcción de pilotes de gran diámetro*, Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS, 8a Sesión. Madrid.
- [10] PUERTOS DEL ESTADO (2005), *Recomendaciones geotécnicas para el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias ROM 0.5-05*, Ministerio de Fomento. Madrid.
- [11] Sanchez Dominguez, F. y otros (2006), *Recomendaciones para la ejecución e interpretación de ensayos de integridad de pilotes y pantallas 'in situ'*, Laboratorio de Geotecnia del Cedex, Ministerio de Fomento, Madrid.

CFT&Asociados, S.L.
Rosellón, 340 • 08025 Barcelona
☎: 932 076 630 Fax: 932 076 665
Web: www.fernandeztadeo.com