

APLICACION DE METODOS NO DESTRUCTIVOS A LOS CONTROLES DE CIMIENTOS PROFUNDOS EN ESPAÑA

B. BENATOV (*)

C. FARACO (**)

A. NOUET (***)

RESUMEN. Se exponen en este artículo las posibilidades de auscultación de cimientos profundos (pilotes y pantallas) mediante la aplicación de métodos no destructivos, tales como los denominados métodos de sondeo sónico y de impedancia mecánica.

Se hace una descripción de algunas anomalías detectadas, mediante estos procedimientos, en obras realizadas en España. Estas técnicas son práctica habitual en países como Holanda, Francia, Gran Bretaña o Estados Unidos.

ABSTRACT. *This article presents the capabilities of deep foundation testing (piles and diaphragm-walls) with the application of non-destructive methods, such as sonic coring and mechanical impedance.*

These techniques are common practice in countries such as the Netherlands, France, Great Britain and the United States. The description of the methods is presented as well as some case histories of some tests performed in Spain.

1. INTRODUCCION

Los cimientos profundos constituyen una «parte oculta» de cualquier obra. Sin embargo, la cimentación debe ofrecer la suficiente garantía para que la transmisión de las cargas estructurales al terreno se realice adecuadamente.

Los métodos no-destructivos de control de continuidad e integridad de pilotes o pantallas ya ejecutados permiten establecer un diagnóstico rápido y a bajo coste, mediante equipos ligeros, asegurando la calidad del hormigón del fuste y del contacto en punta con el terreno, evitando el recurso a pruebas de carga estáticas o perforaciones a lo largo del fuste con recuperación de testigos, debiéndose realizar una investigación exhaustiva sólo de aquellas anomalías detectadas realmente preocupantes.

Hace tres años se introdujo en la Península un abanico de técnicas de auscultación desarrolladas por el «Centre Expérimental de recherches et d'études du Bâtiment et des Travaux Publics» (CEBTP) de París, entre las cuales se encuentran los métodos no destructivos de control de cimientos profundos. Hasta la fecha, se han

controlado más de 1.600 pilotes en España empleando el método de transparencia sónica o sondeo sónico y el de impedancia mecánica.

Se presenta en primer lugar una descripción resumida de los métodos, dejando al lector interesado la posibilidad de profundizar indicándole una bibliografía afín. A continuación se comentan la auscultación de un pilote de prueba y una serie de casos reales, guiando al lector en la interpretación de los resultados de los ensayos.

2. PRESENTACION DE LOS METODOS

2.1. METODO DE SONDEO SONICO

En un hormigón homogéneo, la velocidad de propagación de las ondas de presión es constante. En presencia de anomalías (inclusiones terrosas, coqueas, hormigón deslavado, segregación, zonas de baja resistencia, etc.) esta velocidad cae rápidamente. El sondeo sónico es una medición continua a lo largo del fuste de la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas entre una sonda emisora y una sonda receptora que se desplazan dentro de dos tubos metálicos solidarios a la armadura. El equipo incluye un osciloscopio, un generador de impulsos, una impresora, un torno y dos sondas, emisora y receptora (figuras 1 a 3). Dichas sondas se bajan hasta la base del pilote y se suben a velocidad constante. La señal se transmite a un procesador que la visualiza sobre un osciloscopio y la modula para ser restituida a papel. El resultado es una diagrafi que relaciona el tiempo de propagación de las ondas en función de la profundidad

(*) Ingeniero Civil Diplomado E.P.F. (Zurich). Director General de EUROCONSULT, S. A.

(**) Dr. Ingeniero Caminos, Canales y Puertos. Profesor Titular E.T.S. Arquitectura. U.P.M. Director General de EUROCONSULT GEOTECNIA, S. A.

(***) Ingeniero Superior Industrial Diplomado por el Instituto Nacional Politécnico de Lorena (Nancy). Director Técnico de EUROCONSULT-CEBTP, S. A.

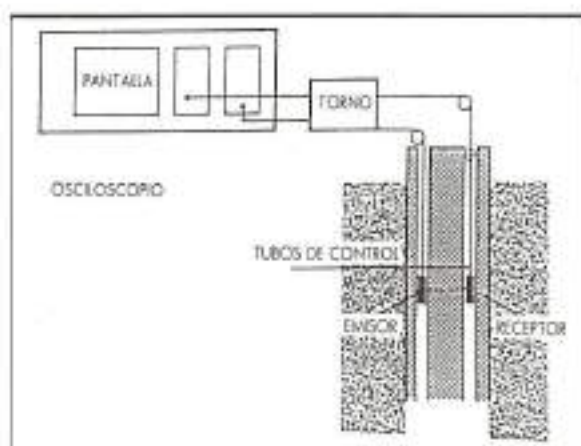


FIGURA 1. Sondeo sísmico. Esquema de principio.

(figura 4). Cada anomalía provoca un brusco aumento del tiempo de recorrido de las ondas.

Este método permite comprobar la continuidad del pilote o de la pantalla auscultada, detectar anomalías y localizarlas con precisión, apreciar la homogeneidad y la calidad del hormigón. El método obliga a una programación previa ya que los tubos se colocan antes del hormigonado.

Los tubos para la auscultación del fuste del pilote son metálicos, rellenos de agua, y su diámetro interior debe ser al menos de 1 1/4". Caso de que se quiera prever la perforación posterior de la punta del pilote a través de uno de los tubos de auscultación, éste debe tener un diámetro mínimo de 4" y dejarse a unos 50 cm del fondo del pilote, al objeto de poder disponer de testigo del sondeo si se detectara una anomalía. Esto posibilita que la perforación de punta del pilote se realice a un coste moderado. La perforación de esos 50 cm de hormigón debe complementarse con otros 50 cm de suelo.

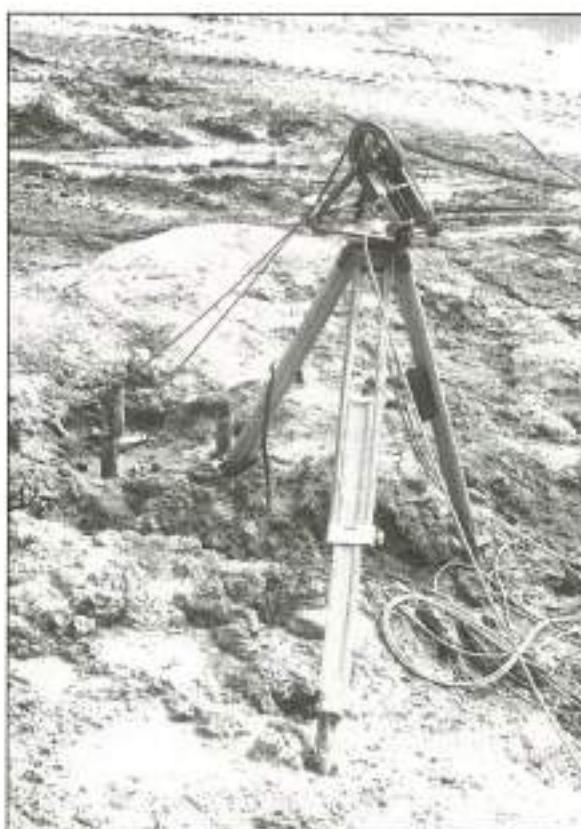


FIGURA 2. Realización del ensayo sísmico.

Un dispositivo de este tipo presenta el inconveniente de impedir la auscultación de la parte final del pilote puesto que el tubo de auscultación que prevé la perforación de la punta no llega al fondo (figura 5).

Si ninguno de los tubos de auscultación tiene un diá-

FIGURA 3. Registro de la señal en un ensayo por el método sísmico.



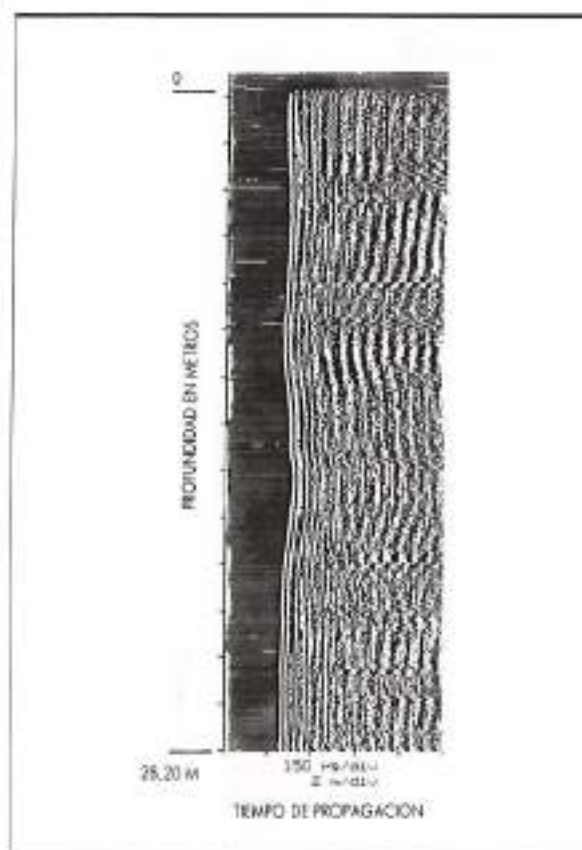


FIGURA 4. Diagrama de un pilote sin anomalía.

metro suficiente, la evaluación de las características del hormigón de una eventual anomalía ha de realizarse mediante un sondeo desde la cabeza del pilote, si bien éste se puede realizar por métodos destructivos hasta un metro por encima de la anomalía detectada, realizándose a continuación el sondeo con recuperación de testigo.

Las medidas se realizan cuando el hormigón tiene una edad de tres días e interesa sólo la parte central del fuste comprendida entre los tubos (figura 6), por lo que no se puede excluir que la existencia de un defecto superficial situado en el borde del pilote pase inadvertido.

Por otra parte el método sónico no permite controlar la calidad del contacto hormigón-suelo, puesto que los tubos se dejan a unos 10 cm del fondo, en el mejor de los casos, es decir, hasta la base de la caja de armaduras; no obstante, el sondeo con recuperación de testigo, que podría ser considerado como un procedimiento absolutamente fiable, no tiene por qué reflejar el estado real del pilote en punta y sus resultados pueden resultar optimistas (figura 7).

2.2. METODO DE IMPEDANCIA MECANICA

La propagación de una onda de presión a lo largo del fuste de un pilote ha sido ya estudiada, en particular para la línea de pilotes donde se define, por analogía eléctrica, la impedancia mecánica como la relación V/F (Velocidad/Fuerza). El método de impedancia se basa en el estudio de esta relación en función de la frecuencia de excitación. La excitación armónica se consigue mediante el espectro deducido por transformadas de Fourier de un impacto transmitido por el martillo equipado con un sensor de fuerza. Un geófono colocado en cabeza

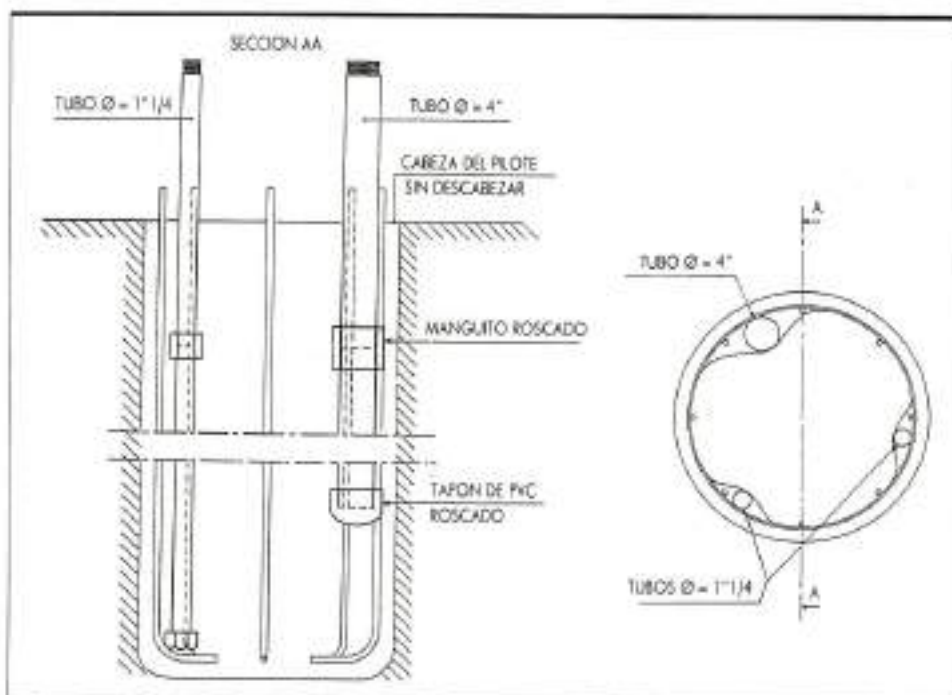


FIGURA 5. Disposición de los tubos de auscultación y de sondeo mecánico en un pilote de diámetro inferior o igual a 1,20 m.

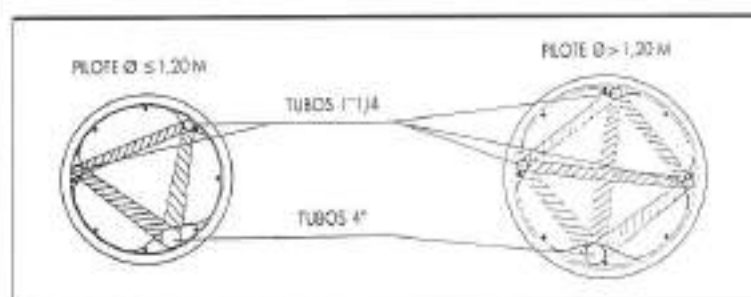
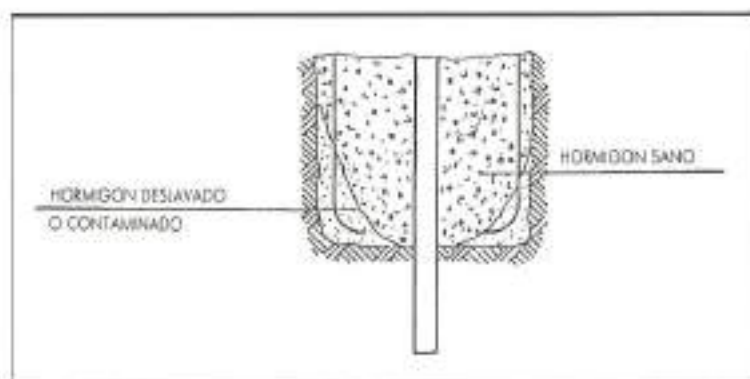


FIGURA 6. Sólo se auscultan las zonas rayadas en el ensayo por sondeo sísmico.

FIGURA 7. Sondeo mecánico central en punta de un pilote: la anomalía periférica no se detecta.



recoge la velocidad (figuras 8 y 9). Un analizador procesa ambas señales y permite trazar la curva de admitancia (figura 10) sobre la cual se aprecian tres parámetros principales: la rigidez a baja frecuencia, la admitancia característica y las resonancias que permiten localizar las incidencias que pueden corresponder a la punta del pilote, al empotramiento terminal, a un estrechamiento, a un empotramiento intermedio, etc.

Este método permite comprobar la integridad del pilote auscultado, detectar anomalías y localizarlas, apreciar la calidad del hormigón y las características geométricas del pilote. El método está limitado por la esbeltez del pilote. La relación Longitud/Diámetro debe ser inferior a 20 a causa del amortiguamiento de la onda en el terreno a lo largo del fuste. El método no requiere programación previa, ya que solamente precisa preparar sobre la cabeza del pilote descabezado dos zonas pulidas donde se colocará el geófono y se dará el impacto. El hormigón debe tener un mínimo de cinco días.

3. DEFECTOS DE EJECUCION DE CIMENTACIONES PROFUNDAS

Los defectos de ejecución de un pilote moldado in situ pueden concretarse en un mal contacto en punta con el suelo o en heterogeneidades a lo largo del fuste.

Si el defecto es en punta y el pilote trabaja fundamentalmente por punta existe el riesgo de asentamientos inadmisibles de la cimentación, al hacer trabajar al resto de los pilotes del grupo a cargas superiores a aquellas para las que fueron dimensionados.

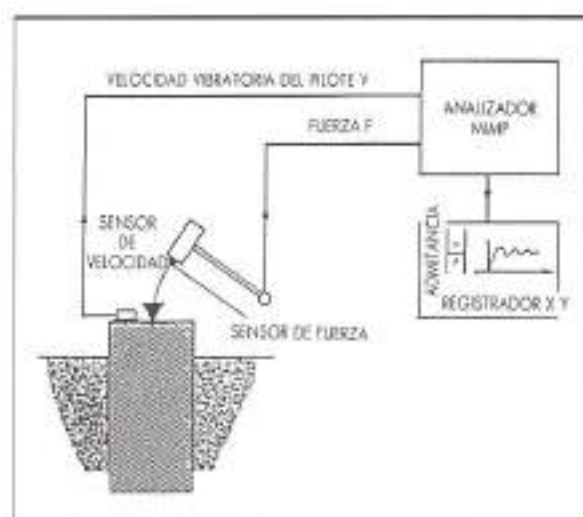


FIGURA 8. Impedancia mecánica. Esquema de principio.

Cuando el defecto se localiza en el fuste, una determinada sección puede soportar tensiones superiores a las de cálculo y puede sobrepasar la resistencia del hormigón, originándose asentamientos en cabeza. Por otra parte, estas secciones soportan mal las flexiones comportándose más bien como articulaciones.

En definitiva los defectos de ejecución pueden tener consecuencias graves y conviene tener en cuenta tam-



FIGURA 9. Realización del ensayo de impedancia mecánica.

bién el comportamiento a largo plazo, es decir, el empeoramiento de un determinado defecto con el tiempo por merma de resistencia de armaduras y hormigón.

4. AUSCULTACION DE UN PILOTE DE PRUEBA POR SONDEO SONICO

En el recinto del Laboratorio de EUROCONSULT, S. A., se ha realizado un pilote experimental con hormigón H-250, de diámetro 1.000 mm y de 2.500 mm de profundidad. En él se han instalado cuatro tubos de auscultación, como se indica en la figura 11, y se ha simulado una serie de defectos.

4.1. SIMULACION DE DEFECTOS

Defecto D1: En punta, se ha dejado medio cilindro de material suelto (arena) sobre una altura de 500 mm.

Defecto D2: Un corte en la totalidad de la sección del

fuste se ha materializado mediante placas de Porexpan que forman un cilindro de 200 mm de altura.

Defecto D3: Una discontinuidad en la calidad del hormigón se ha realizado con una capa intercalada de hormigón pobre sobre un espesor de 250 mm.

Defecto D4: Mediante arandelas de Porexpan apiladas alrededor de un tubo de auscultación, se ha simulado una coquera de 300 mm de altura y 100 mm de diámetro.

4.2. INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS DE LA AUSCULTACION

En la figura 12 se muestran las seis diagragfias realizadas. Para materializar la subida de las sondas dentro del fuste del pilote, la escala elegida ha sido de 50 cm/división, lo que permite tomar medidas cada 1,25 cm. El tiempo para que las ondas ultrasónicas pasen de un

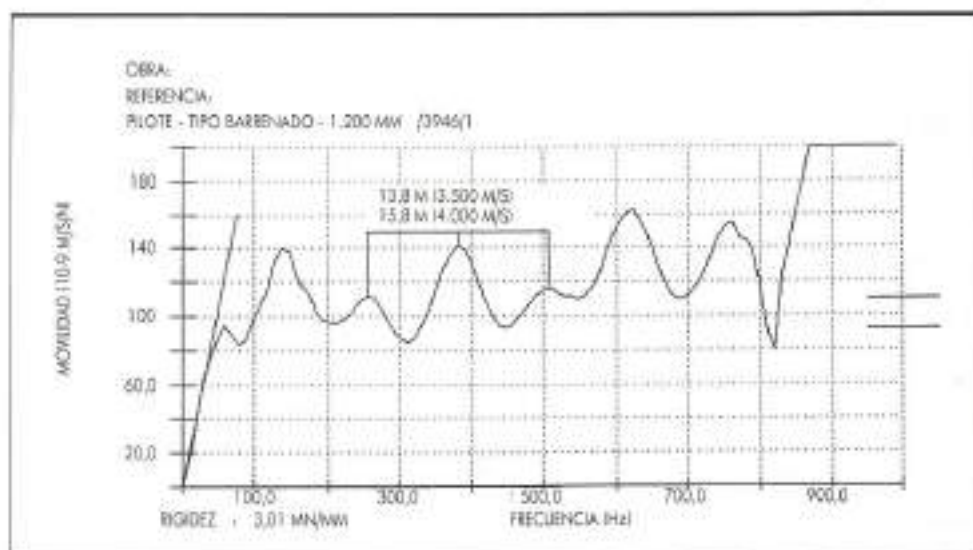


FIGURA 10. Curva de admitancia mecánica.

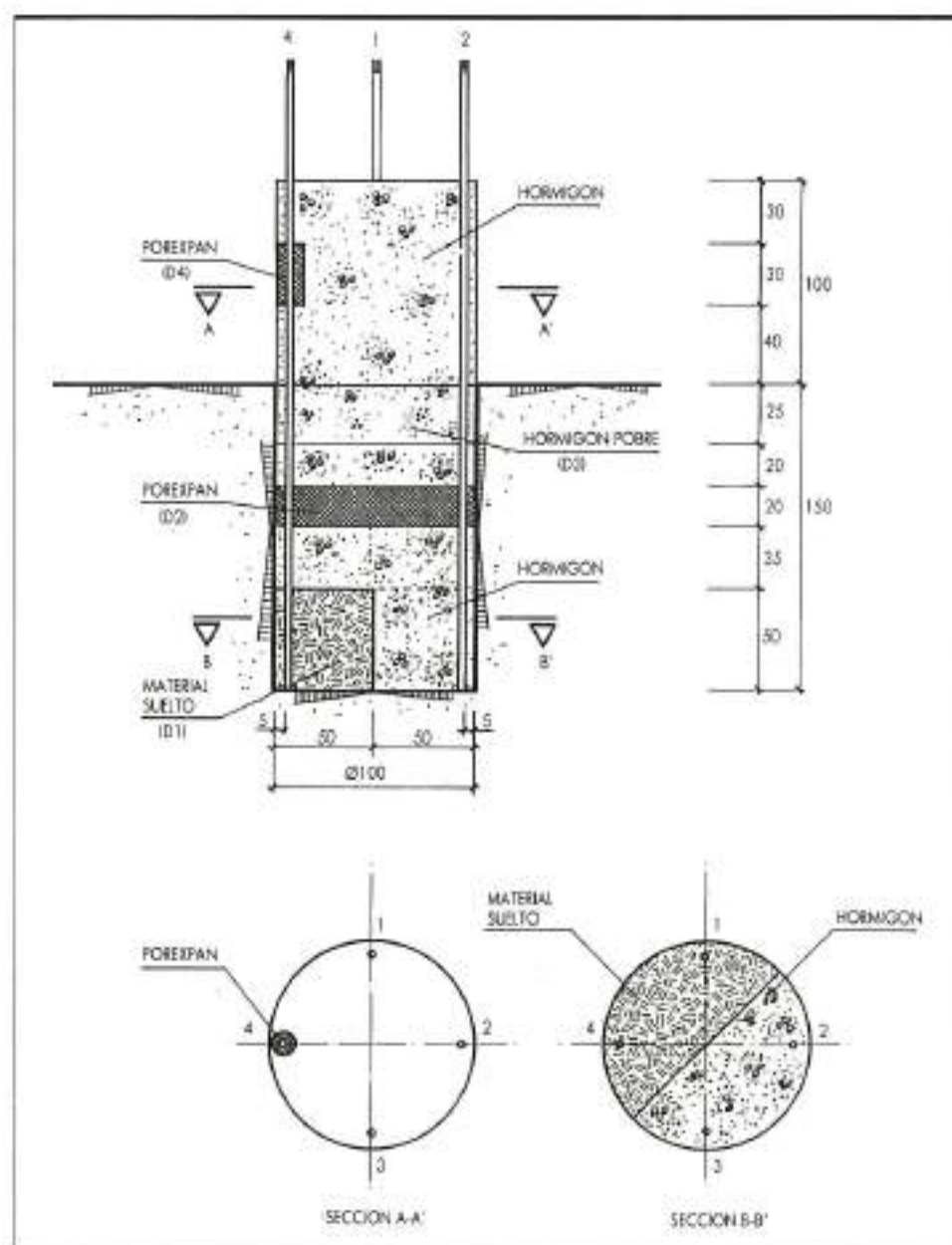


FIGURA 11. Esquema del pilote de prueba.

tubo a otro se aprecia con la escala horizontal (100 μ s/división). Este tiempo es mayor en los barridos cruzados. Los tubos n.º 2, 3 y 4 se apoyan sobre el fondo de la excavación. El tubo n.º 1 está 5 cm por encima de esta cota.

Defecto D1 (figuras 12a, 12c, 12d, 12e y 12f): La presencia de arena se traduce en un importante retraso y desaparece la señal sobre los últimos 40 cm. La figura 12b no refleja lógicamente esta anomalía. Dado que ambas sondas tienen una altura del orden de 20 cm y se focalizan, tanto en emisión como en recepción en su centro, los últimos 10 cm del pilote no están recogidos.

Defecto D2 (figuras 12a, 12b, 12c, 12d, 12e y 12f): La difícil propagación a través del Porexpan obliga a las ondas ultrasónicas a recorrer los tubos metálicos y buscar el hormigón sano. Ello provoca un retraso progresivo del tiempo de llegada y su vuelta a la normalidad pasado el espesor de 20 cm.

Defecto D3 (figuras 12a, 12b, 12c, 12d, 12e y 12f): El retardo es globalmente constante sobre 25 cm, lo que se traduce en una relativa homogeneidad del hormigón pobre. Se puede observar la junta fría en la parte superior de hormigón pobre (figura 12a y 12b).

Defecto D4 (figuras 12c, 12d y 12f): El fenómeno

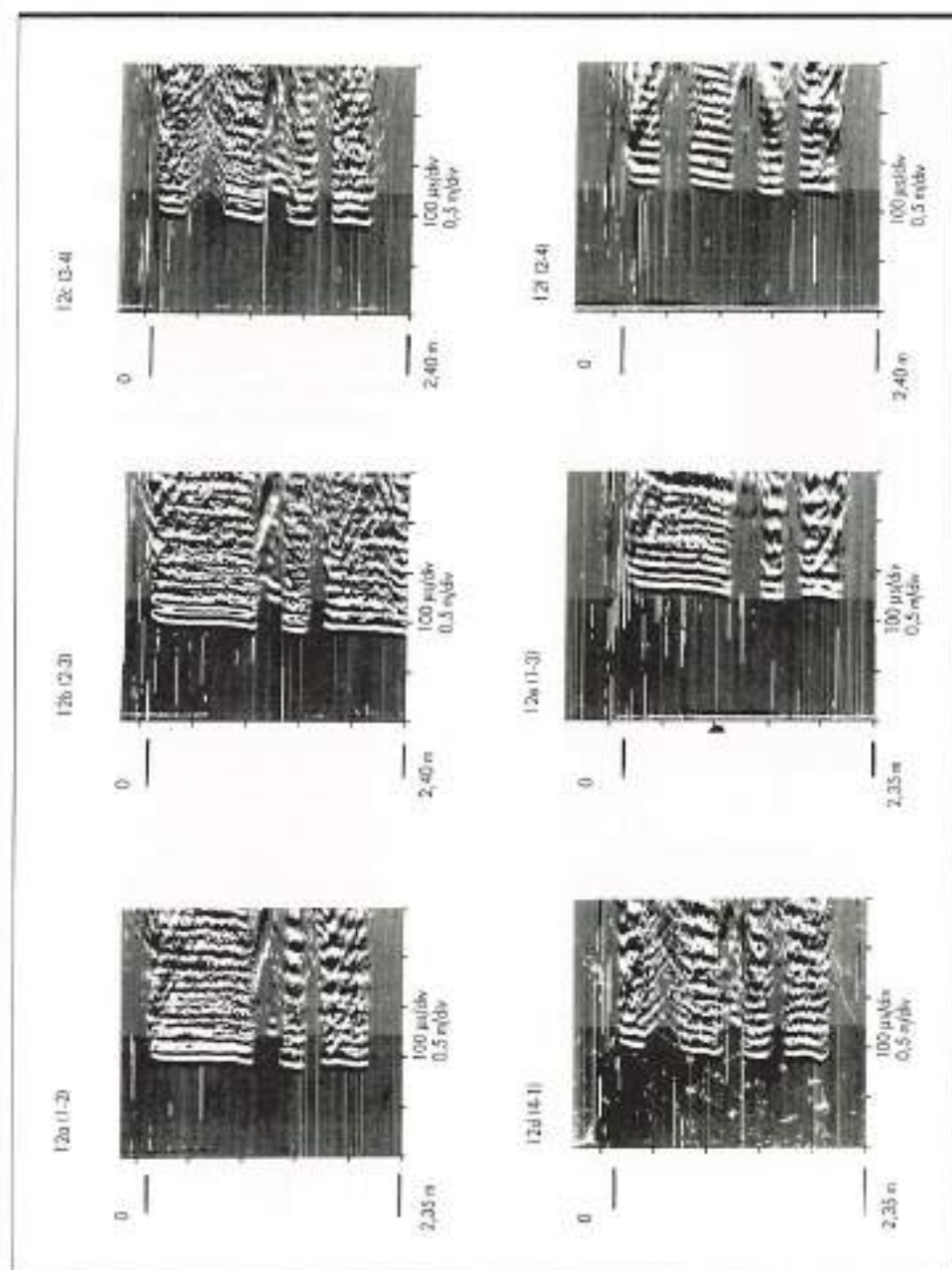


FIGURA 12. Auscultación del pilote de prueba.

aparece en las diagrfias que implican al tubo donde se ha colocado el Porexpan. Al igual que para el defecto D2, se observa cómo el tiempo de llegada primero se alarga y luego se reduce, si bien con menos intensidad.

5. ALGUNOS CASOS REALES

La rápida detección (a veces confirmación de inquietudes formuladas a partir de las observaciones del control de obra) de anomalías de ejecución permite al constructor intervenir, estudiar y subsanar el problema a tiem-

po. Las anomalías se pueden clasificar de varias formas; por ejemplo por su posición geométrica: en cabeza o cerca de la cabeza, en el fuste o en la punta.

5.1. ANOMALIA EN CABEZA

Caso 1 (figura 13): Se analizó un pilote de diámetro 1.500 mm, que era parte integrante de la cimentación de una pila de un viaducto en una variante de carretera. El pilote fue instrumentado con 4 tubos de auscultación para el empleo del método de sondeo sísmico. La diagrfia muestra un retraso en la llegada de la señal provoca-

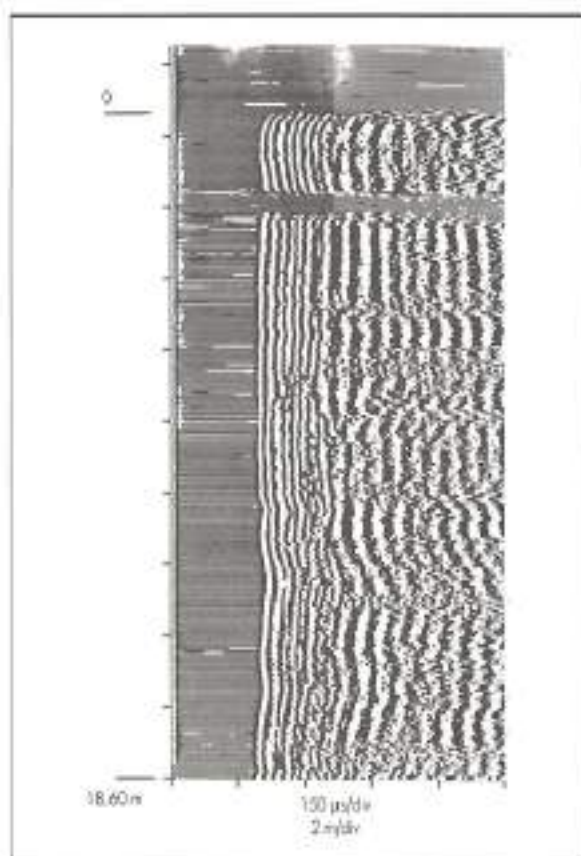


FIGURA 13. Diagrama. Caso 1.

da por una pérdida de compacidad de material a 2,20 m de profundidad. El fenómeno aparecía en cinco de las

seis diagramas realizadas (tres perimetrales y dos cruzadas).

La excavación alrededor del pilote hasta este nivel permitió descubrir la presencia de arena, en esa zona del pilote, debido al desmoronamiento de las paredes durante su ejecución. Se descabezó el pilote hasta alcanzar el hormigón sano y se reconstruyó hasta la cota del proyecto.

Caso 2 (figura 14): El análisis por el método de impedancia mecánica de una cimentación por pilotes de 420 mm de una serie de edificios industriales determinó la existencia de anomalías en siete de ellos. La curva de impedancia muestra un fuerte régimen vibratorio a las profundidades comprendidas entre 0,90 y 1 m. La rigidez de los pilotes con anomalías era muy inferior a la de sus vecinos.

La excavación realizada alrededor de uno de ellos permitió confirmar la presencia de un hormigón disgregado a la profundidad indicada. Los siete pilotes fueron dados por defectuosos, y se resolvió el problema mediante un recálculo de la cimentación y la realización de otros pilotes adicionales.

5.2. ANOMALIA EN EL FUSTE

Caso 3 (figura 15): En un pilote de diámetro 1.500 mm, correspondiente a la cimentación de un viaducto, se empleó el método de sondeo sísmico. Además del mismo tipo de defecto, en cabeza, observado en el caso 1, se aprecia un retraso en la llegada de la señal a 6,50 m. A pesar de la profundidad, se decidió excavar y la anomalía fue confirmada, por lo que el pilote fue demolido hasta esta cota y recrecido mediante encofrado.

5.3. ANOMALIA ENCONTRADA EN PUNTA

Caso 4 (figuras 16 y 17): Se realizó un estudio por el

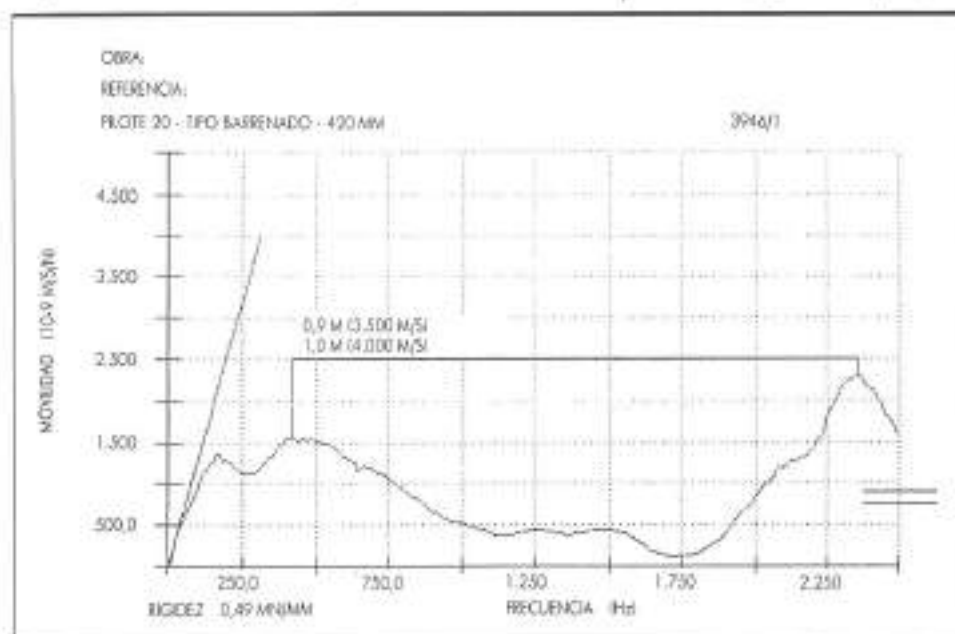


FIGURA 14. Curva de impedancia. Caso 2.

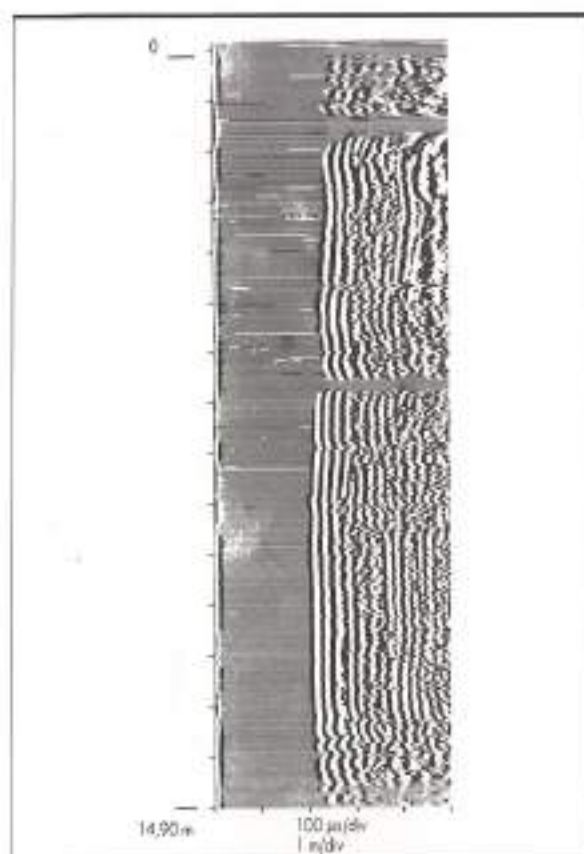


FIGURA 15. Diagrama, Caso 3.

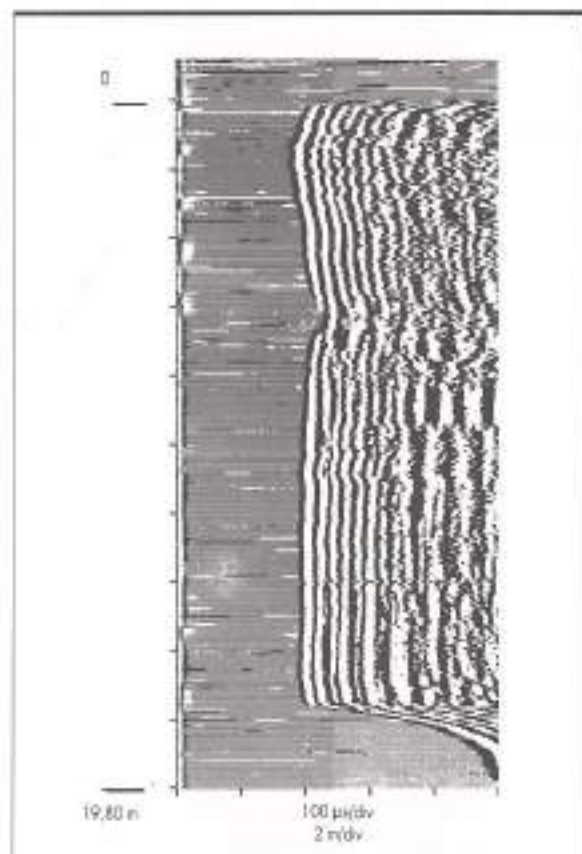


FIGURA 16. Diagrama, Caso 4.



FIGURA 17. Caja de testigos correspondiente a la zona de punta del pilote, Caso 4.

método de sondeo sónico de un pilote de 1.500 mm de diámetro, instrumentado con cuatro tubos de auscultación. En la diagrafi (figura 16) se observa un alargamiento progresivo y muy marcado del tiempo de propagación, que parece corresponder a un deterioro de las características del material en punta. El fenómeno apareció en las seis diagrafi realizadas.

Se perforó el pilote hasta la punta para sacar un testigo que permitiera apreciar las características de dicho material. En la figura 17 se muestra una fotografía de la caja de testigos correspondiente, en la que se aprecia el material existente en la zona de la punta. Al aparecer un hormigón deslavado, se procedió a una inyección de lechada en la punta, al objeto de asegurar la resistencia de cálculo del pilote.

6. CONCLUSION

Los criterios para el control de cimentaciones dependerán del tipo de obra. Existen obras en las que no parece admisible adoptar ningún tipo de riesgo. En algunas obras públicas que se apoyan en pocos puntos de cimentación, consistentes en pilotes de gran diámetro, pilas-pilotes o elementos de pantalla, un control sistemático de todos los pilotes representará un costo despreciable frente al costo total de la obra. En otro tipo de obras en las que no se admiten asentamientos diferenciales, será necesario realizar un control completo de las cimentaciones.

En todo caso se debe ponderar la incidencia de los factores económicos y de aceptación de un riesgo determinado.

Por otra parte, las características geotécnicas del terreno inciden de forma importante en la calidad de la ejecución.

Los defectos de ejecución son, afortunadamente, poco frecuentes, pero se presentan en particular cuando los terrenos son difíciles. El control no destructivo permite garantizar la continuidad y la integridad de los cimientos, o detectar anomalías y localizarlas rápida-

mente y, si fuese necesario, se puede realizar una excavación alrededor del pilote o realizar un sondeo mecánico con extracción de testigo para comprobar las características de la zona anómala.

En el marco de un plan de control global estos métodos permiten reducir el número de pruebas de carga, limitándolas a los casos estrictamente necesarios.

En definitiva, el control sistemático de cimientos profundos, práctica habitual en países como Holanda, Francia, Gran Bretaña o Estados Unidos, ofrece la posibilidad de:

- a) Seguir de cerca la ejecución de los primeros elementos de cimentación para confirmar o invalidar la técnica de ejecución empleada.
- b) Detectar un cemento defectuoso antes de su puesta en carga.
- c) En caso de defectos verificados, tomar las decisiones adecuadas, según la importancia de dichos defectos, en cuanto a su reparación o aceptación, en función de los coeficientes de seguridad empleados en el cálculo.

BIBLIOGRAFIA

- PAQUET, J. «Etude vibratoire des pieux en béton: réponse harmonique et impulsionnelle; application au contrôle». *Annales ITBTP*, n.º 245 (mayo de 1968).
- PAQUET, J. «Contrôle des pieux par carottage sonique». *Annales ITBTP*, n.º 262 (octubre de 1969).
- BRIARD, M. «Contrôle des pieux par la méthode des vibrations». *Annales ITBTP*, n.º 270 (junio de 1970).
- DAVIS, A. G., y DUNN, C. S. «From theory to field experience with the non-destructive vibration testing of piles». *Proc Instn. Civ. Engrs. Part 2* (1974).
- JIMENEZ SALAS, J. A., y otros. «Geotecnia y Cimientos, III, 1.ª. Ed. Rueda (1975).
- DAVIS, A. G., y ROBERTSON, S. A. «Vibration testing of piles». *Structural Engineer* (junio de 1976).
- LCPC Y SETRA. «Pieux forés, recueil des règles de l'art». Document du Ministère des Transports (1978).
- CSTB. «Travaux de Fondations Profondes pour le Bâtiment». Document Technique Unifié, n.º 13.2 (junio de 1978).



EUROCONSULT GEOTECNIA, S.A.
INGENIEROS DE CONSULTA

ACREDITADA EN EL AREA DE ENSAYOS "IN SITU" DE SUELOS (R.D.1230/1989)

ESTUDIOS GEOLOGICOS Y GEOTECNICOS ASISTENCIA TECNICA

SONDEOS DE RECONOCIMIENTO
PENETROMETROS DINAMICOS Y ESTATICOS
ENSAYOS PRESIOMETRICOS

AVDA. MONTES DE OCA SN. ZONA INDUSTRIAL SUR
SAN SEBASTIAN DE LOS REYES. 28760 (MADRID) TELEFONO: 952 76 02 FAX: 652 39 88

DELEGACIONES

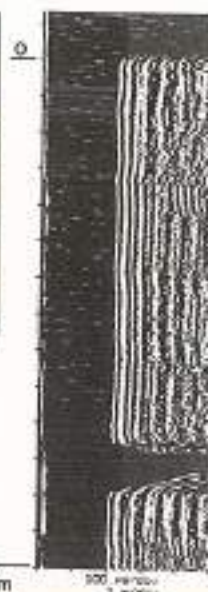
SANTANDER: 942 57 40 47

SANTIAGO DE COMPOSTELA: 981 56 19 89

SALAMANCA: 923 23 05 54



- *Auscultación y gestión de carreteras*
- *Ensayos especiales*
- *Monumentos históricos*



AUSCULTACION
DE
CIMIENTOS
PROFUNDOS



EUROCONSULT-CEBTP

APDO.99 S.S. DE LOS REYES - 28.700
(MADRID)

TELEFONO: (91) 652 30 11
TELEFAX: (91) 652 39 88



Isidoro Sánchez, S. A.

El futuro, hoy



Ronda de Atocha, 16 - 28012 MADRID. Tel: 467 53 63. Fax: (91) 239 22 16

Distribuidor exclusivo de

SOKKIA