



Escola Politècnica Superior
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

ARQUITECTURA TÉCNICA

PROYECTO FINAL DE CARRERA

ESTUDIO SOBRE ENSAYOS DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE PILOTES: METODOS Y EJEMPLOS DE INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Projectista: Daniel Gómez García

Directores: Kàtia Gaspar Fàbregas/Francesc Jordana Riba

Convocatoria: Febrero de 2010

RESUMEN

El presente documento trata de exponer los métodos de ensayo más utilizados hoy en día para la comprobación de la integridad de pilotes, pantallas y elementos de cimentaciones profundas en general, en las que por ser inaccesibles prácticamente en su totalidad, no se puede comprobar que el elemento se ha ejecutado correctamente y que va a satisfacer las exigencias para las que ha sido diseñado. Con este fin de asegurar que la cimentación profunda de una estructura está ejecutada según lo previsto, se explica el funcionamiento de los dos métodos de ensayo más usados actualmente en España: el método “sónico” o “Eco sónico”, y el método “ultrasónico Cross-Hole” o “Transparencia Sónica”.

Primeramente se define la tipología de pilotes que existen, el campo de aplicación de los pilotes, la normativa aplicable, haciendo hincapié en los pilotes de hormigón armado realizados “in situ” o pilotes prefabricados, así como métodos de excavación y hormigonado, ya que dichos ensayos son aplicables únicamente a pilotes de hormigón.

En la parte central del documento, se explica con detalle el funcionamiento de los dos métodos de ensayo, para después poder entender mejor los resultados expresados mediante reflectogramas en el caso del método “Sónico” y las diagráfias en el caso del método “Cross-Hole”. También se explica la aplicación de cada uno de los dos métodos, y lo más importante, la interpretación de los resultados obtenidos en los ensayos, y poder transformar las posibles anomalías obtenidas en el ensayo, en defectos o fallos físicos en el pilote o elemento ensayado, para poder determinar el estado del elemento, y poner una solución en el caso de que fuera necesario.

También se explica en la tercera parte del documento, los defectos más comunes que suelen ocurrir durante la construcción de este tipo de elementos, para poder intuir, en función de los resultados de ensayo, que ha podido pasar, por esto también es imprescindible saber la forma de construcción de los pilotes y cualquier detalle, que sumado a los resultados de ensayo, nos aportará información suficiente para establecer el estado de la cimentación.

Finalmente, en los anejos, se presentarán ejemplos reales de ensayos realizados en obra, tanto de método “Sónico” como de método “Cross-Hole”, explicando las anomalías detectadas, y su interpretación como defectos físicos.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	5
1. PILOTES	7
1.1 CAMPO DE APLICACIÓN DE LOS PILOTES.....	7
1.2 NORMATIVA SOBRE CIMIENTOS PROFUNDOS.....	9
1.3 TIPOS DE PILOTES	11
1.3.1 Pilotes de Madera	12
1.3.2 Pilotes Metálicos	13
1.3.3 Pilotes Mixtos	14
1.3.4 Pilotes de Hormigón Armado	16
1.4 PILOTES PREFABRICADOS DE HORMIGÓN ARMADO	17
1.4.1 Pilotes de Hormigón Pretensado	18
1.4.2 Pilotes prefabricados de Hormigón Armado	19
1.5 PILOTES “IN SITU” DE HORMIGÓN ARMADO CON DESPLAZAMIENTO	22
1.6 PILOTES DE HORMIGÓN ARMADO CON EXTRACCIÓN	23
1.6.1 Materiales utilizados en Pilotes Perforados	24
1.6.2 Ejecución	26
2. ENSAYOS DE INTEGRIDAD.....	35
2.1 ENSAYO DE INTEGRIDAD POR EL MÉTODO SÓNICO	35
2.1.1 Explicación del método de ensayo.....	35
2.1.2 Ejecución del ensayo	39
2.1.3 Interpretación de resultados.....	42
2.2 ENSAYO DE INTEGRIDAD POR EL MÉTODO ULTRASÓNICO.....	45
2.2.1 Explicación del método de ensayo.....	46
2.2.2 Requisitos para la ejecución del ensayo.....	48
2.2.3 Ejecución del ensayo	49
2.2.4 Interpretación de resultados.....	50

3. DEFECTOS FÍSICOS DE PILOTES	53
3.1 PROBLEMAS DE CONSTRUCCIÓN DE LOS PILOTES	53
3.1.1 Roturas en cabeza de los pilotes	53
3.1.2 Cortes de hormigón	54
3.1.3 Estricciones, estrechamientos o cuellos de botella	54
3.1.4 Desprendimientos de material en el fondo de excavación o en niveles intermedios	55
3.1.5 Lavado de finos del hormigón	56
3.1.6 Los defectos en punta del pilote	57
3.2 CLASIFICACIÓN DE DEFECTOS-CAUSAS	57
3.3 DISTINCIÓN ENTRE ANOMALÍAS, FALLOS Y DEFECTOS	61
3.4 ANÁLISIS DE DEFECTOS	63
3.5 INSPECCIONES COMPLEMENTARIAS-REPARACIONES	64
CONCLUSIONES	67
BIBLIOGRAFÍA	69
ANEJO Nº1 ENSAYOS MÉTODO SÓNICO	71
ANEJO Nº2 ENSAYOS CROSS-HOLE	81

INTRODUCCIÓN

La realización de cimentaciones profundas, nos presentan el inconveniente de no poder saber con certeza lo que sucede durante la ejecución, ya que son elementos inaccesibles normalmente.

En los últimos años se han desarrollado técnicas para detectar defectos en la construcción de pilotes y cimentaciones profundas en general, mediante ensayos de integridad estructural, que en España se utilizan desde hace pocas décadas, pero hace relativamente poco tiempo que se realizan por parte de empresas españolas. Estos ensayos de integridad nos suministran información sobre las dimensiones y el estado de elementos profundos en el terreno, una vez ejecutados, para asegurar su continuidad. Pretenden únicamente aportar información adicional sobre las cimentaciones profundas, para comprobar que se han ejecutado según lo previsto, y que no ha surgido ningún problema durante su construcción. No aportan información directa sobre el comportamiento o resistencia de los mismos en condiciones de carga.

Los dos métodos más extendidos por el territorio Español actualmente, son el método sónico y el método ultrasónico, una herramienta para poder determinar experimentalmente la existencia de defectos en los pilotes con rapidez y economía. En el caso de detectar anomalías, se pueden emplear otros métodos para investigar las causas, y determinar si el pilote o elemento es apto para el uso destinado, como la excavación alrededor del elemento o sondeos con extracción de testigos. La realización de sondeos solo permite conocer datos del testigo extraído. Si el defecto es puntual, podría ser que no obtuviéramos información sobre dicho defecto, y también se ha de tener en cuenta que la posición del sondeo respecto al eje del pilote, es difícil de conocer si la profundidad es grande.

La interpretación de resultados debe realizarse por personal cualificado y experimentado, ya que a pesar de que las herramientas informatizadas y electrónicas nos facilitan el registro de resultados, se requiere de una experiencia para poder determinar si las anomalías detectadas son importantes y afectan a la integridad estructural.

En el caso de realizarse ensayos en la totalidad de los pilotes, o en un muestreo significativo, las cargas admisibles por razón estructural de los pilotes se podrán incrementar en un 20%, de acuerdo con la norma francesa de pilotes DTU 13.2, o en un 25% según el Código Técnico de la Edificación.

1. PILOTES

Habitualmente se denomina “pilote” todo elemento lineal de cemento cuya longitud es igual o superior a ocho veces la dimensión menor de su sección.

Los primeros pilotes de hormigón armado se utilizaron en 1897 en los cimientos de las fábricas de Babcock-Wilcox, proyectadas por Hennebique. Los cimientos profundos más antiguos utilizan pilotes de madera. Los poblados de paláfitos se sustentaban mediante este tipo de cimientos, que son descritos con precisión por Vitrubio en el año 59 d.d.J.C.

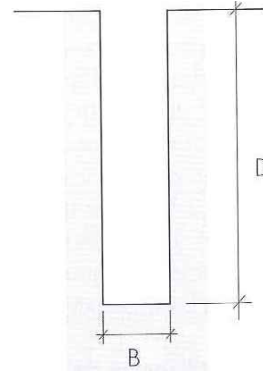


Figura 1.1: Profundidad y anchura de un pilote

Actualmente se siguen utilizando: se han empleado de eucalipto y pino para cimentar edificaciones agrícolas en zonas próximas a marismas y en terrenos formados por arcillas expansivas. Su durabilidad enterrados y bajo el nivel freático puede ser de siglos; sin embargo existen casos en los que su durabilidad es pequeña. Su destrucción puede ser debida a las siguientes causas:

- Acción de hongos: comienza en las partes húmedas situadas sobre el nivel freático produciendo su putrefacción.
- Acción de insectos xilófagos (carcoma, termitas): actúan frecuentemente sobre madera húmeda o atacada por hongos.
- Acción de moluscos del género “Teredo” y crustáceos del género “Limnoria”: el teredo perfora y ataca el interior del pilote. La limnoria ataca en partes sumergidas en agua marina situadas fuera del terreno. Las limnorias son las “pulgas de mar” que comen el pilote, cortándolo en un nivel ligeramente superior al de la línea de agua.

1.1 CAMPO DE APLICACIÓN DE LOS PILOTES

Se debe utilizar este tipo de cimiento cuando técnica, económica, constructivamente y desde los puntos de vista de seguridad y plazo, sea la solución óptima. A continuación se expone la relación de algunos casos habituales:

- Es necesario recurrir a pilotes o en general a cimientos profundos cuando el estrato de terreno situado directamente bajo la construcción no tiene capacidad portante suficiente o cuando los asentamientos previsibles son excesivos.
- Cuando la gran permeabilidad del terreno, los niveles freáticos altos, la necesidad de entibaciones costosas o la exigencia de plazos de ejecución reducidos limitan la utilización de los cimientos superficiales por razones de coste, plazo y riesgo.
- La existencia de una capa con capacidad portante pequeña a poca profundidad puede hacer necesario un cimiento superficial de grandes dimensiones, con un coste superior a un cimiento mediante pilotes de longitudes cortas (de 6 a 7 m).
- Sobre arcillas expansivas se debe cimentar a profundidades en las que pueda garantizarse la ausencia de variación en la humedad del terreno. Los pilotes suelen ser una solución óptima.
- En edificios altos con pocos soportes o en otros casos en los que aparezcan fuertes cargas concentradas, el cimiento profundo proporciona ciertas ventajas:
 - Reducción del plazo de ejecución.
 - Mayor índice de mecanización, con estructura del coste en la que la mano de obra es mínima y mayor productividad.
 - Menor riesgo y menos problemas previsibles que los probables en un cimiento superficial. Esta razón ha sido decisiva en muchos casos para la elección de cimiento profundo.
- Cuando es preciso que los pilotes alcancen longitudes superiores a 25 m, se deben estudiar otras alternativas de cimiento. Debe procederse de igual modo cuando se trata de grandes almacenes o naves poco cargadas. Las alternativas suelen consistir en la mejora de terrenos o en la utilización de cimientos compensados.
- En la actualidad, los pilotes pueden alcanzar profundidades superiores a 60 m y diámetros de hasta 4 m, con cargas que sobrepasan los 20.000 kN por unidad.
- Los pilotes pueden considerarse, "a priori", como la solución más adecuada en los siguientes casos:

1. Transmisión de cargas a través del agua, fangos o terrenos blandos, hasta una capa portante que sea capaz de resistir los esfuerzos que el pilote transmite por punta (pilote-columna) o a través del fuste y la punta (pilote fuste y columna) tal y como se muestra en la figura 1.2.

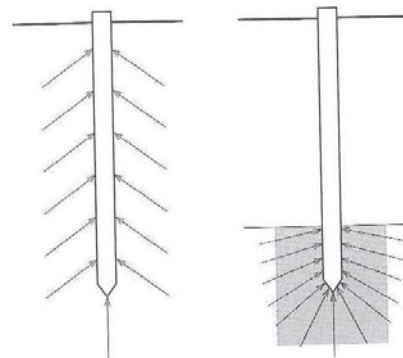


Figura 1.2: Mecanismos de sustentación; pilote fuste-columna y pilote columna

2. Transmisión de cargas a un estrato de gran espesor de un terreno de poca capacidad portante por rozamiento lateral a lo largo del fuste del pilote flotante.
3. Incremento de la capacidad portante de terrenos sueltos, pulverulentos, al aumentar su compacidad (pilotes de compactación).
4. Para referir el cimiento a una profundidad superior a la de socavones o posibles quedades y para garantizar el funcionamiento del cimiento ante posibles erosiones del terreno.
5. Se utilizan, trabajando a tracción, para anclar elementos constructivos sometidos a subpresiones (losas) o a momentos de vuelco (muros o zapatas con gran excentricidad).
6. Pilotes de protección o “duques de Alba”. Tienen por función proteger

construcciones marítimas contra el choque de navíos u objetos flotantes.

7. Se utilizan pilotes inclinados como elementos resistentes ante esfuerzos originados por grandes acciones horizontales ó inclinadas (figura 1.3).

8. Construcción de pantallas que facilitan la realización de excavaciones profundas.

9. El cimiento mediante pilotes es adecuado en terrenos de arcillas expansivas, siempre que se tengan en cuenta los esfuerzos producidos por rozamiento negativo o se utilicen técnicas que los anulen.

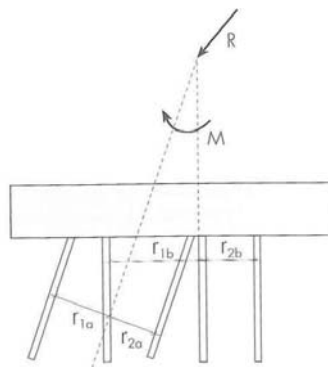


Figura 1.3: Pilotes Inclinados

1.2 NORMATIVA SOBRE CIMIENTOS PROFUNDOS

En el Documento Básico de Seguridad Estructural de Cimientos del Código Técnico de la Edificación (DB SE-C), se definen los tipos de pilotes, acciones estructurales a considerar en el dimensionado, análisis estructural, así como también la puesta en obra y fijándose las condiciones constructivas y de control de ejecución.

En el apartado 5.4.4 “Ensayos de Pilotes” de dicho documento del CTE, se definen los ensayos posibles a realizar, entre los que destacan los ensayos de integridad de que trata este documento.

Hasta la aparición del Código Técnico de la Edificación, no existía en España normativa específica de obligado cumplimiento sobre pilotes, aunque podían reseñarse los siguientes puntos al respecto, extraídos de normas de carácter más amplio:

- Para encepados de pilotes, la Instrucción EHE de 2008, hace referencia a pilotes en grupo de 2 o más, sin mencionar los pilotes aislados (en el punto 58.6: “Pilotes” la instrucción dice: “la comprobación de un pilote es análoga a la de un soporte, Artículo 54, en que el terreno impide, al menos parcialmente, el pandeo”. Se considerará, en cualquier caso, una excentricidad mínima definida de acuerdo con las tolerancias.

Para el dimensionamiento de los pilotes hormigonados “in situ”, sin camisa de chapa, se utilizará un diámetro de cálculo d_{cal} igual a 0,95 veces el diámetro nominal del pilote, d_{nom} , cumpliendo con las siguientes condiciones:

$$d_{nom} - 50\text{mm} \leq d_{cal} = 0,95d_{nom} \leq d_{nom} - 20\text{mm}$$

como elemento estructural de “hormigón en masa, armado o pretensado” le es aplicable la instrucción EHE.

- La “norma de Construcción Sismorresistente” NCSE-02, en su punto 4.2, dice textualmente: “...no se considerará la resistencia de fuste de los pilotes en la zona de éstos colindante con estratos susceptibles de licuarse durante un sismo”.
- La norma tecnológica NTE CPI es de utilidad para la elección del tipo de pilote y fija criterios de diseño, cálculo y control. Está prevista la normativa europea referente a cimientos profundos, concretamente en el Eurocódigo N°7.

Otros documentos interesantes son:

- D.T.U., “Documento Técnico Unificado” (Francia, 1978). Este es, tal vez, el documento técnico oficial más completo sobre pilotes, que tiene además la ventaja de contar con revisiones continuas, lo que supone una actualización acorde con la evolución tecnológica.
 - “Código de prácticas de cimentaciones”. Dinamarca 1977.
-

- “Normas Tecnológicas Españolas” específicas de pilotes. En la actualidad existen los siguientes volúmenes:

NTE CPI/1977: “Pilotes in situ”

NTE CPP/1978: “Pilotes prefabricados”

NTE CPE/1978: “Encepados de pilotes”

NTE CCP/1982: “Pantallas”

No ha de olvidarse que estas normas no son de obligado cumplimiento.

1.3 TIPOS DE PILOTES

Atendiendo al material que los constituye, pueden diferenciarse los siguientes tipos de pilotes:

- Madera:
 - Bruta
 - Tratada
- Metálicos:
 - Acero:
 - Pilotes en H
 - Pilotes tubulares
 - Tablestacas
 - Fundición
- Mixtos:
 - Hormigón – madera
 - Madera – metal
 - Acero – hormigón
- Hormigón armado:
 - Prefabricados
 - Ejecutados “in-situ”
 - Con desplazamiento
 - Con extracción
 - Micropilotes

1.3.1 Pilotes de Madera

Los pilotes de madera están formados por un rollizo de madera (tratada o no) de eucalipto o pino. Su diámetro varía de 8 a 15 cm y rara vez su longitud es superior a seis metros. La cabeza se suele proteger con un aro de chapa metálica que evita su rotura por la acción del golpe de maza durante la hincada. Se utiliza una maza de 100 a 200 kp (excepcionalmente llega a 500 kp) colgada de una cabria, normalmente formada por tres rollizos de madera. La maza se deja caer libremente sobre la cabeza del pilote desde una altura de 60 a 100 cm; su accionamiento suele ser manual.

Se han empleado y aún se emplean, aunque cada vez menos, para cimientos de edificios de una a dos plantas y almacenes en zonas con terrenos expansivos o baja capacidad portante (marismas).

Pueden utilizarse para mejorar el terreno, hincándolos muy próximos entre sí como apoyo de losas de cimentación, cimientos de canales de riego y, en general, en construcciones de escasa importancia.

En la actualidad, los pilotes de madera suelen aceptarse para construcciones permanentes cuando están sumergidos o bajo el nivel freático, ya que existen reglamentos que prohíben su empleo fuera del agua; en esta situación, pueden emplearse con tratamiento previo con creosota, insecticidas y fungicidas.

Dentro del agua del mar hay que protegerlos con manguitos, metálicos o de hormigón, situados en el tramo hincado ya que pueden ser atacados por moluscos perforadores o teredos.

En España, un gran inconveniente es su limitada longitud; son abundantes y baratos los de madera de pino y eucalipto de hasta 5 m de largo. El precio aumenta considerablemente con la longitud y a partir de los 10 m no se utilizan, salvo en casos muy especiales. Una vez terminada la hincada, las cabezas deben ser escuadradas hasta que aparezca material sano destinado a recibir el encepado, normalmente de hormigón.

Antes de verter el hormigón se protege la cabeza de los pilotes tratados con una chapa de zinc, con pintura o plomo, o bien se la envuelve con un tejido sobre el cual se vierte la breca caliente.

1.3.2 Pilotes Metálicos

Los pilotes metálicos más empleados son los siguientes: de perfil H, tubulares y tablestacas en línea o unidas en forma de cajón (figura 1.4).

- Pilotes de perfil en H

Son de acero laminado. Las cabezas y el fuste tienen el mismo espesor. El espesor mínimo del acero es de 10 mm y el canto suele ser igual o mayor de 20 cm. La cabeza del pilote se remata con un macizo de hormigón. Se colocan en obra por golpeo o vibración y en su dimensionamiento hay que tener en cuenta los riesgos de corrosión.

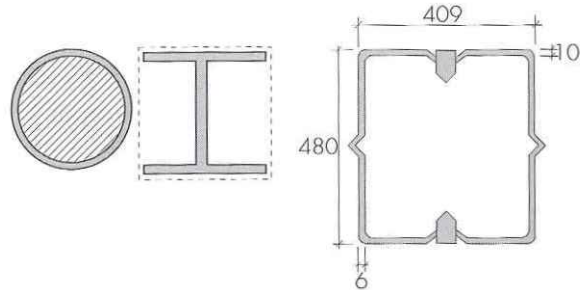


Figura 1.4: Tipos de pilotes metálicos

- Pilotes tubulares

Los pilotes tubulares están formados por tubos estirados en frío sin soldadura o soldados. Resisten muy bien la flexión y a la vez son muy flexibles.

Se pueden hincar con la punta abierta o cerrada: los pilotes abiertos pueden ser hincados a la profundidad requerida tras lo cual se extrae el terreno; a los pilotes cerrados se les coloca en la punta un azuche que puede ser cónico, plano o piramidal (figura 6.5).



Figura 1.5: Azuches y manguitos de unión para pilotes metálicos tubulares

Habitualmente, los pilotes tubulares tienen un diámetro mínimo de 25 cm y un espesor de pared de 8 mm. Cuando tienen la punta abierta, pueden hincarse a mayor profundidad extrayendo el terreno a medida que avanza la hincadora. Si al profundizar se alcanzan bloques de piedra u otros obstáculos, éstos se pueden demoler con trépano o explosivos.

Cuando la extracción de los detritus resulta difícil se utilizan pilotes cerrados.

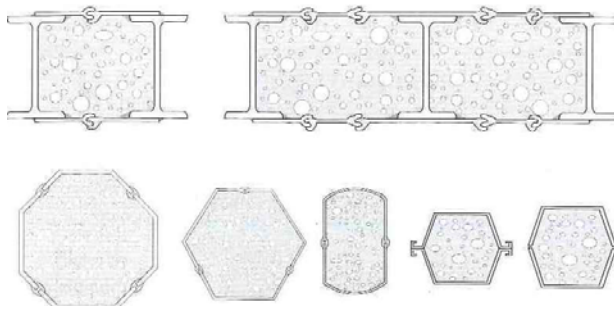


Figura 1.6: Secciones por cajón obtenidas por soldadura longitudinal de tablestacas y empleadas como pilotes metálicos

- Pilotes-tablestaca

Los pilotes-tablestaca son pilotes tubulares con sección en forma de cajón. Están compuestos por varias tablestacas soldadas longitudinalmente (figura 1.5). Existe la posibilidad de rellenarlos con hormigón, total o parcialmente.

- Pilotes de fundición

Actualmente no se utilizan pilotes de fundición, más resistentes a la corrosión que los de acero, pero mucho más frágiles.

- Riesgo de corrosión de los pilotes metálicos

Aunque los pilotes de acero pueden sufrir corrosión, el riesgo es reducido. La velocidad de la corrosión por la acción del terreno es función del potencial de despolarización y de la conductividad del mismo. La polarización es el aumento o la disminución de la corriente eléctrica que se produce al disminuir o aumentar la resistencia de un circuito. Despolarizar significa, por tanto, interrumpir la polarización. La magnitud de ambos factores se obtiene mediante un ensayo con el que se miden el potencial y la resistividad.

Los pilotes metálicos se emplean habitualmente en edificación en algunos países. En España se utilizan casi exclusivamente en obras marítimas, donde se exigen grandes esfuerzos, especialmente de flexión y donde la realización de otros tipos de pilotes exige dejar una camisa metálica, al menos en la parte superior. Su costo resulta muy superior al de los pilotes de hormigón.

1.3.3 Pilotes Mixtos

Son combinaciones de elementos metálicos, de madera y de hormigón. Pueden distinguirse los siguientes tipos:

- Pilotes de madera-hormigón: los elementos de madera se sitúan bajo la capa freática y el hormigón en la parte superior. Su razón de ser consiste en el aumento de la durabilidad respecto a los pilotes de madera (figura 1.7).

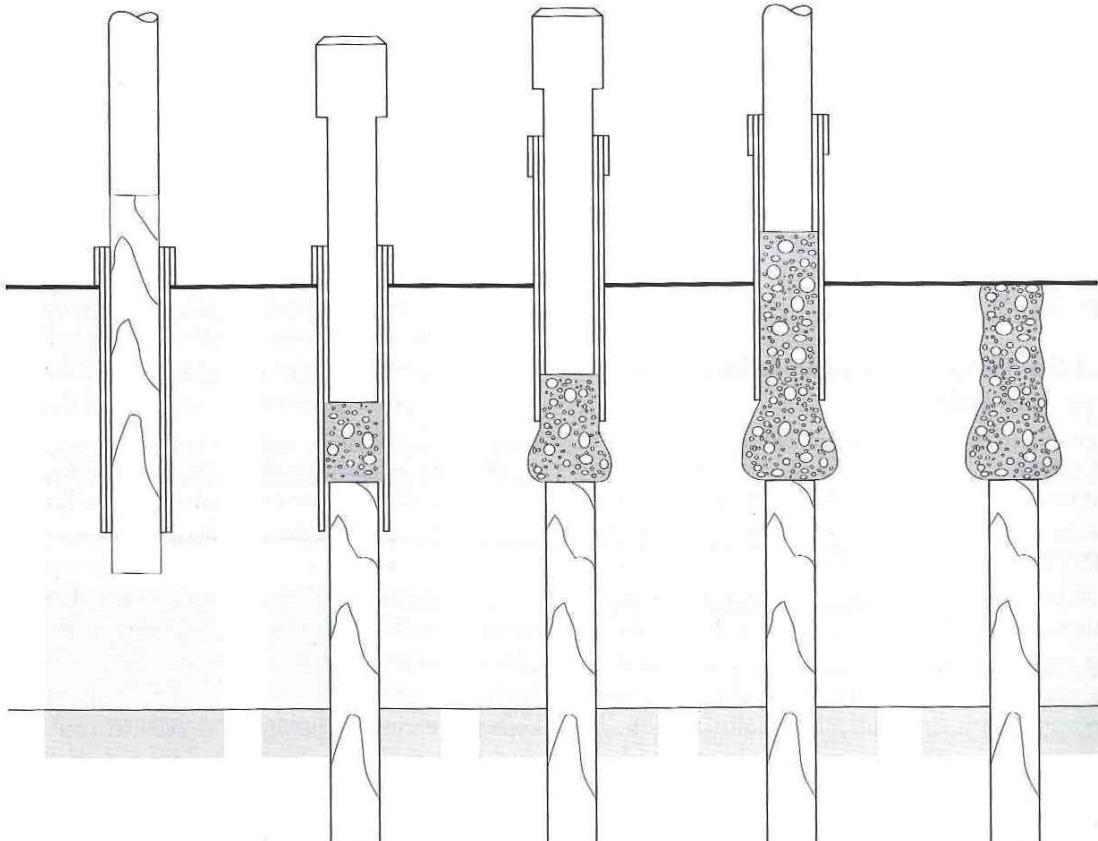


Figura 1.7: Proceso de construcción de un pilote mixto madera-hormigón

- Pilotes de madera-metal: constan de una parte metálica en la punta para facilitar la hincada y un aro de chapa en la parte superior que protege la cabeza durante dicha operación (figura 1.8).

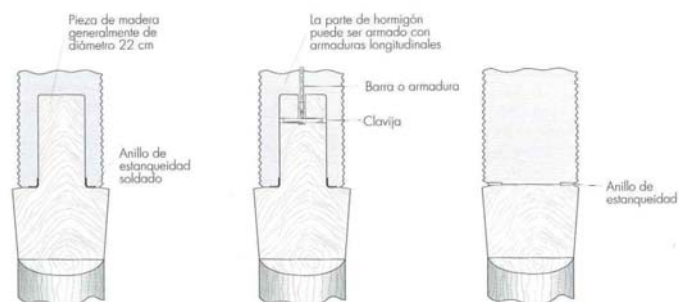


Figura 1.8: Detalle de la cabeza en varios tipos de pilotes de

- Pilotes de acero-hormigón: son tubulares rellenos con hormigón (figura 1.9). se pueden producir en ellos tracciones y roturas del acero por hinchamiento del hormigón cuando se hincan bajo el agua. En ocasiones se introducen armaduras para protección y aumento de la capacidad resistente.

En todos estos elementos compuestos la junta de unión es la zona más débil, por lo que deben atenderse las siguientes

1. Los dos materiales deben estar en contacto directo permitiendo de este modo la transferencia de la carga total entre ambas partes.
2. La junta debe resistir cierto grado de esfuerzo de tracción y flexión.
3. La ejecución del pilotaje debe ser sencilla (figura 1.7).

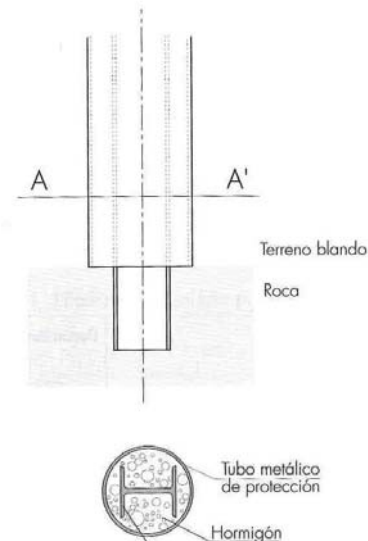


Figura 1.9: Pilote mixto acero-hormigón

1.3.4 Pilotes de Hormigón Armado

Existen varios tipos de pilotes de hormigón armado; con objeto de simplificar su estudio pueden clasificarse en cuatro grupos:

1. **Pilotes prefabricados:** se realizan en instalaciones fijas, situadas normalmente fuera de la obra y se hincan mediante golpeo. También suelen prefabricarse en la propia obra; en este caso es normal que sean de longitud fija.
2. **Pilotes “in situ” con desplazamiento:** se introduce una tubería mediante hincado y se rellena el hueco interior con hormigón armado. Durante el proceso de hincado se produce desplazamiento del terreno. La tubería cuenta en su extremo con un azuche o un tapón de gravas. En ambos casos el pilote debe profundizar hasta un estrato resistente (se debe producir rechazo). En el primer caso el azuche se pierde; en el segundo al llegar a la profundidad prevista el golpeo directo sobre el tapón de gravas permite formar un bulbo que queda completamente configurado al verter el hormigón. En ambos casos, la tubería puede ser recuperable o resultar perdida.
3. **Pilotes “in situ” con extracción:** en todos los sistemas de este tipo se produce el vaciado del terreno que ocupará el pilote sin que exista desplazamiento del mismo. La extracción del terreno puede llevarse a cabo mediante alguno de los siguientes procedimientos. Sin entubación ni lodos (con barrena continua o discontinua), con entubación perdida o recuperable (usando cucharas y trépanos) y sin entubación (utilizando lodos bentoníticos que aseguran la estabilidad del hueco durante el proceso de excavación). En éste

último caso pueden utilizarse diferentes herramientas dependiendo de las características del terreno.

La siguiente tabla presenta una clasificación de los distintos tipos de pilotes:

Figuras	Tipo		Denominación
Figura 1.12 Figura 1.14 y 1.16 Figura 1.11	Prefabricados	De hormigón armado De hormigón armado con azuche De hormigón pretensado Metálicos	CPP 1
Figura 1.28 Figura 1.29 Figura 1.30 Figura 1.31 Figura 1.32	Perforados	Con entubación recuperable Con entubación perdida Con lodos tixotrópicos Sin contención. Barrena continua Sin contención. Barrena parcial de punta	CPI 4 CPI 5 CPI 6 CPI 8 CPI 7
Figura 1.33	Micropilotes	Con entubación Armados con barras Con entubación Armados con tuberías Sin entubación	A.N.T.E. CPI M1 CPI M2 CPI M3
Figura 1.19 Figura 1.18	De desplazamiento Con azuche Con tapón de gravas	Entubado Perdido ⁽¹⁾ Entubado recuperable	CPI 1 CPI 2 CPI 3
<p>(1) Indistintamente para cada tipo de pilote. Se trata de un tubo de sección circular de chapa de acero de espesor mínimo 2 mm. Su función es garantizar la continuidad del fuste del pilote y el fraguado del hormigón en presencia de corrientes de agua, oquedades blandas de terreno y agentes agresivos. El entubado puede ser parcial, puesto que solo es necesario en la zona que puede originar deterioros en el fuste.</p>			

4. **Micropilotes:** se trata de pilotes de pequeña sección, generalmente de forma circular, que tienen diámetros que en general varían entre 75 y 290 mm.

1.4 PILOTES PREFABRICADOS DE HORMIGÓN ARMADO

Los pilotes prefabricados de hormigón se introducen en el terreno mediante hincas. Se utiliza maquinaria especial, que actúa por percusión, mediante una maza que golpea la cabeza del pilote o por vibración. Siempre que se trata de pilotes con desplazamiento pueden ser de hormigón armado o pretensado.

1.4.1 Pilotes de Hormigón Pretensado

Los pilotes prefabricados de hormigón más frecuentemente utilizados son huecos con sección circular y de grandes diámetros.

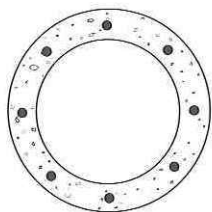


Figura 1.11: Pilote de hormigón pretensado tipo Raymond

Se emplean generalmente en obras marítimas, puentes y cimientos solicitados por grandes esfuerzos. Los primeros utilizados, (en el puente sobre el río Macaraibo), respondían a la patente Raymond (figura 1.11).

En general cada pilote está formado por elementos tubulares prefabricados de hormigón de 5 m de longitud media y está armado normalmente con cuantías pequeñas (mínimas según norma). La longitud total varía normalmente entre 15 y 30 m (en la central térmica de Los Barrios en la Bahía de Algeciras, se han hincado pilotes de 50 m de longitud). El diámetro interior puede hallarse entre 0,6 y 0,9 m, aunque se han llegado a construir con diámetros de 2m.

El espesor de pared es de 0,15 a 0,20 m, aunque excepcionalmente pueden alcanzar 0,25 m o más; los conductos para los cables de postesado tienen diámetros de 20 a 40 mm.

Se utiliza hormigón con resistencia característica (f_{ck}) comprendida entre 45 y 50 N/mm² con tamaño máximo de árido de 20 mm.

El anclaje de los cables de postesado se realiza siempre por adherencia para que sea posible descabezar los pilotes que no queden hincados en su totalidad. Con el postesado se deben producir tensiones de compresión en el hormigón, equivalentes como mínimo a 5 N/mm² en la sección total.

La hincada se hace normalmente por golpeo, con la base abierta; para facilitar el proceso, se emplean métodos tales como la extracción de tierra y la lanza de agua; esta herramienta no debe ser utilizada en la zona de empotramiento. El empalme de piezas está dificultado por el tamaño y la necesidad de realizarse antes de la hincada. Se puede realizar en obra, previendo el espacio necesario, o en fábrica (en este caso se añade el inconveniente del transporte).

Se necesitan grandes medios auxiliares para el izado y el hincado y un estudio muy preciso de la obra ya que las piezas postensadas no pueden cortarse.

1.4.2 Pilotes prefabricados de Hormigón Armado

Los pilotes prefabricados de hormigón armado son normalmente de sección cuadrada de 30 a 50 cm de lado aunque, en ocasiones, también se fabrican hexagonales u octogonales (figura 1.12).

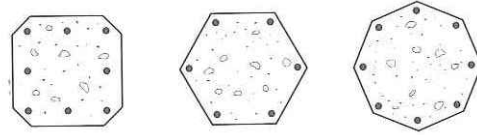


Figura 1.12: Secciones de pilotes de hormigón

Pueden ser fabricados en la propia obra o en plantas de prefabricación.

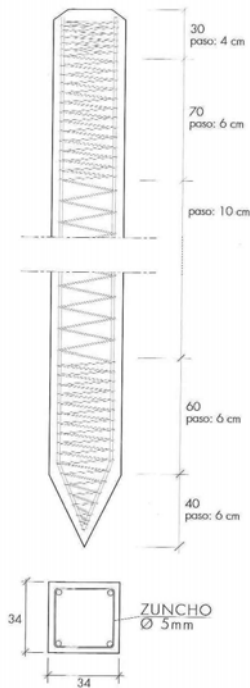


Figura 1.13: Pilote de hincado

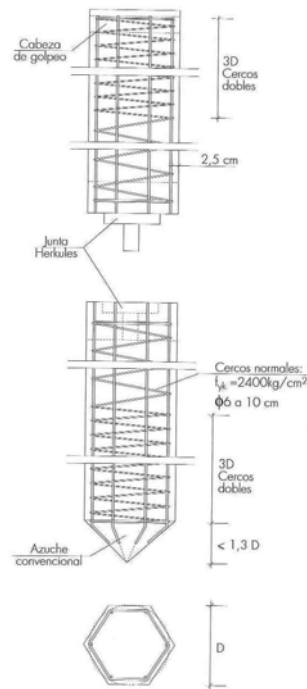


Figura 1.14: Pilote prefabricado empalmable

De acuerdo con las técnicas de funcionamiento y puesta en obra se clasifican en dos grupos:

1. Pilotes de longitud fija

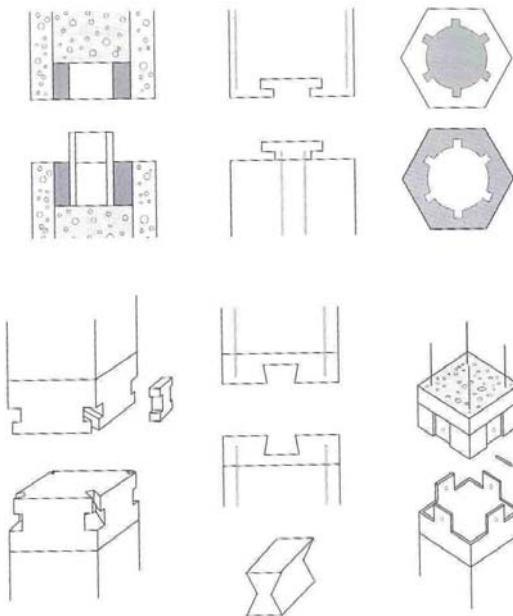


Figura 1.15: Distintos tipos de juntas entre pilotes empalmables

2. Pilotes de longitud variable

Los pilotes fabricados en obra suelen ser de longitud fija, sin posibilidad de empalme (figura 1.13). Pueden recrecerse después de la hincada con dificultad y con la exigencia del correspondiente plazo de fraguado y endurecimiento del hormigón del recrecido. Los pilotes de longitud variable se fabrican en tramos empalmables cuyas juntas suelen ser objeto de patente; tienen secciones que varían entre 400 cm^2 y 1.300 cm^2 (figura 1.15).

Se utiliza hormigón con resistencia característica igual o superior a 40 N/mm^2 . El recubrimiento de armaduras debe ser suficiente y controlado y deben utilizarse cementos especiales para resistir los agentes agresivos externos. Se suele admitir que en este tipo de pilotes, una vez hincados, el hormigón trabaje a $12,5 \text{ N/mm}^2$ mientras que en los pilotes hormigonados "in situ" se considera una resistencia de cálculo del orden de la tercera parte de la resistencia característica.

Las juntas de empalme, que se suelen disponer cada 12 m, tienen mayor resistencia que la sección típica del pilote. El hecho de disponer las juntas a tales intervalos, se debe fundamentalmente a que se hace posible el transporte de las piezas en camiones sin necesidad de obtener permisos especiales.

En España se dispone actualmente de tres tipos de juntas: Johnson, West y A.B.B. Las dos últimas permiten la instalación de un tubo de registro a lo largo

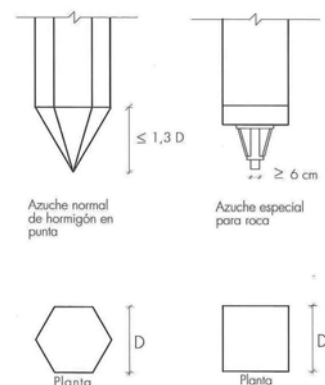


Figura 1.16: Azuches para pilotes de hormigón

del eje, para controlar la verticalidad y la inclinación de los pilotes de gran longitud.

En el extremo inferior, los pilotes están dotados de un azuche plano o en punta cuando se trabaja en terrenos normales. Cuando se prevé que el pilote alcanzará un substrato rocoso se dispone un azuche especial, conocido como “punta de Oslo”, de acero de alta resistencia (figura 1.17). La hincia se completa cuando se alcanza la capa resistente prevista, o n los pilotes flotantes en función del rechazo definido.

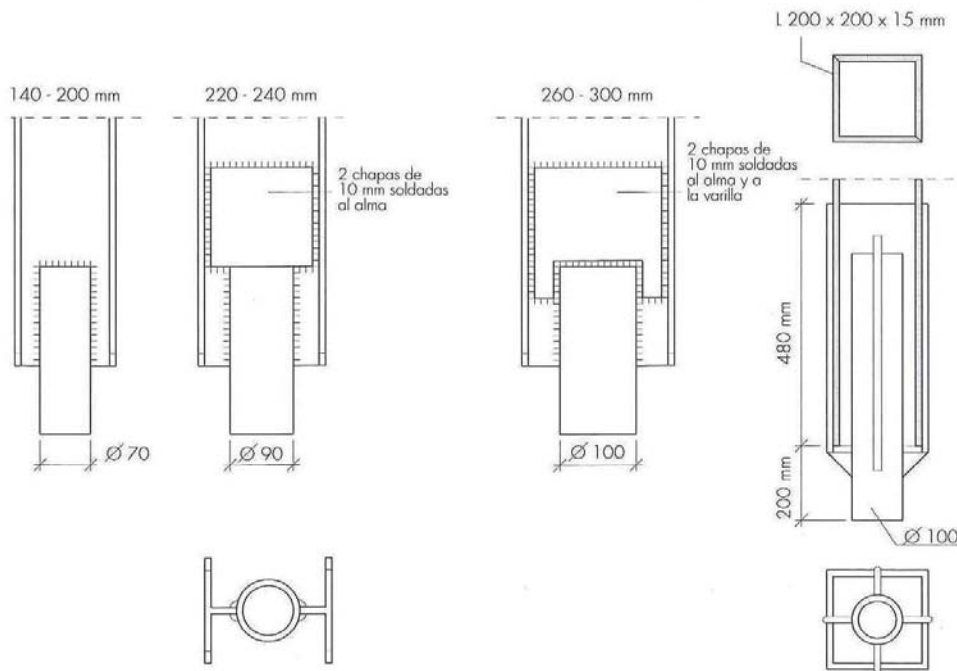


Figura 1.17: Azuches tipo “punta de Oslo”

En términos generales, en la actualidad, los aspectos en los que se están produciendo mayores avances son los siguientes:

- Empleo de materiales de alta resistencia: hormigón de $f_{ck} \geq 40 \text{ N/mm}^2$ y acero de $f_{yk} = 400 \text{ N/mm}^2$
- Mejoras en los procesos de fabricación y curado.
- Empleo de equipos automáticos de hincia, que permiten garantizar la altura de caída y la cadencia de la hincia, con aprovechamiento casi total de la energía.
- Empleo de equipos electrónicos analizadores del proceso, combinados con fórmulas dinámicas.

1.5 PILOTES “IN SITU” DE HORMIGÓN ARMADO CON DESPLAZAMIENTO

En España este tipo de pilote se utiliza cada vez menos. No obstante el más utilizado ha sido el “pilote por desplazamiento”, con tapón de grava y entubado recuperable. Es un pilote circular con entubado de chapa de espesor mínimo 2 cm. Estos pilotes tienen las características que se exponen en la figura 1.18.

En el procedimiento Franki se realizan este mismo tipo de pilotes, con los mismos diámetros de perforación, aunque varían las armaduras:

6 ϕ 12 para pilotes de 357-400 y 436-500

6 ϕ 16 para pilotes de 500-550 y 560-600

La armadura transversal es igual para todos los tipos: ϕ 8 a 20 cm. El hormigón de consistencia plástica o seca. Se exigía un asiento en el cono de Abrams inferior a 5, tamaño máximo de árido inferior a 25 mm y dosificación mínima de 250 kg de cemento/m³. El recubrimiento mínimo de las armaduras era de 40 mm.

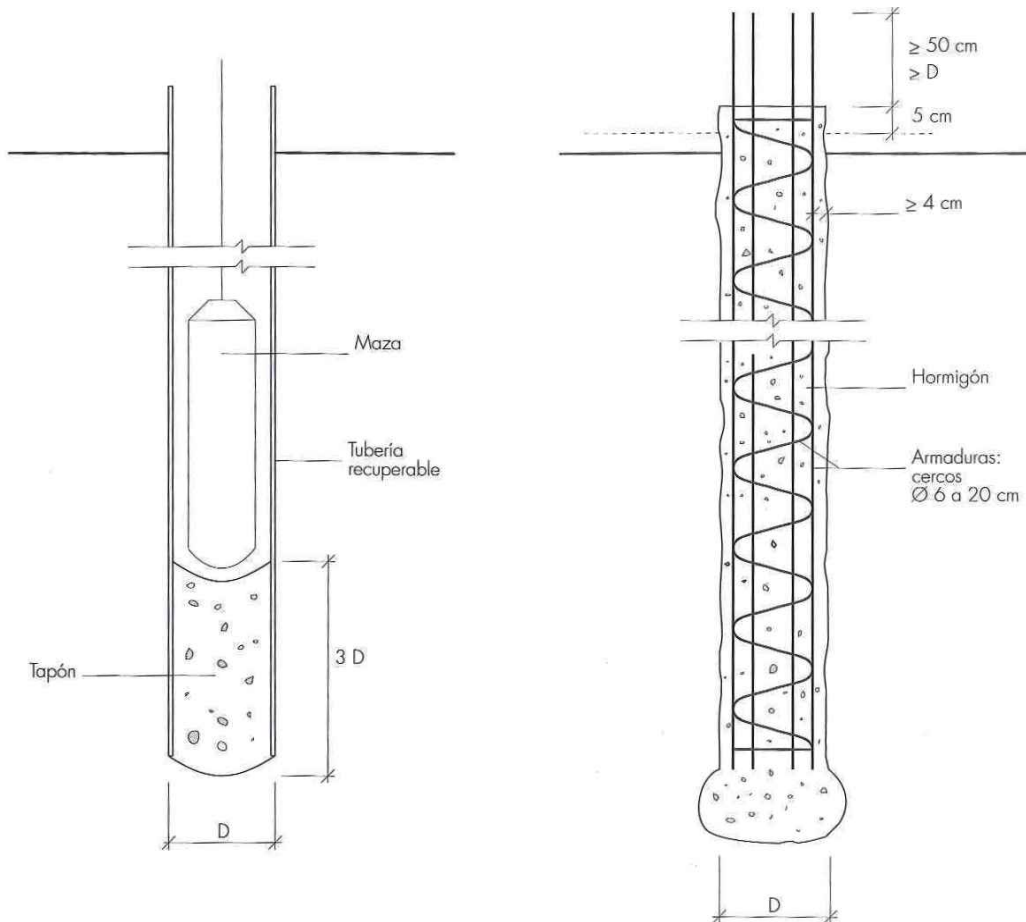


Figura 1.18: Pilote “in situ” con desplazamiento, con tapón de gravas

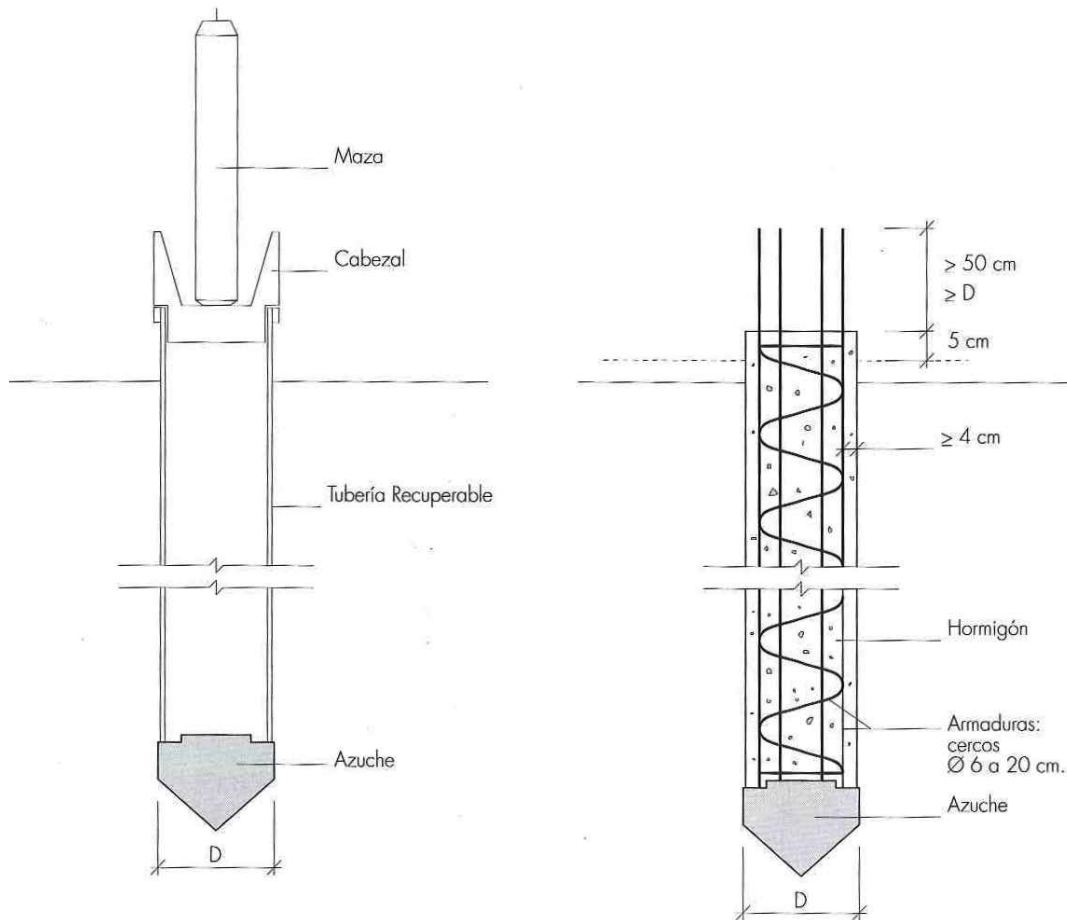


Figura 1.19: Pilote "in situ" con desplazamiento, con azuche

1.6 PILOTES DE HORMIGÓN ARMADO CON EXTRACCIÓN

Se consideran en este apartado los pilotes moldeados en el terreno mediante perforación y otros métodos de excavación, configurados como elementos estructurales para transmisión de cargas.

Atendiendo a la forma de la sección transversal se consideran dos tipos:

- Pilotes circulares.
- "Barretes" o minipantallas, en las que la sección adopta diferentes formas: rectangulares, cruciformes, en T, L, etc. (figura 1.20).

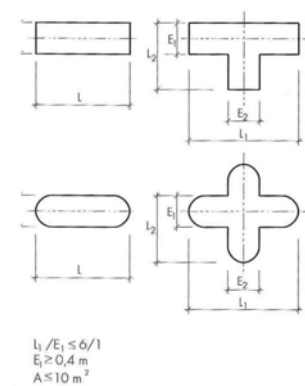


Figura 1.20: Formas de pilotes "barretes".

El fuste puede ejecutarse con sección transversal uniforme; fuste recto; fuste ensanchado o de base ensanchada (figura 1.21).

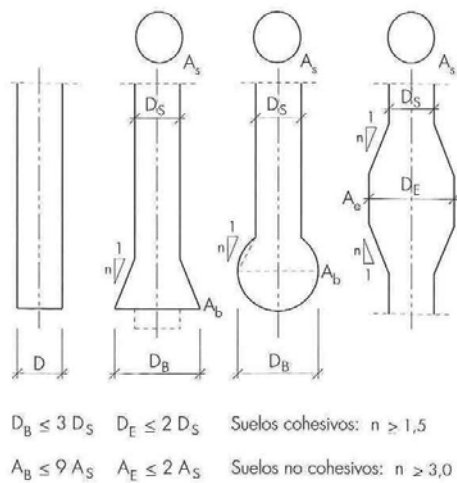


Figura 1.21: Pilotes de fuste recto, base ensanchada y fuste ensanchado

Deben cumplir los siguientes requisitos:

- Diámetro del fuste comprendido entre 0,30 y 2,50 m.
- Dimensión mínima para pilote – barrete, 0,4 m.
- Inclinación no menor de 4:1 con la horizontal (figura 6.45).
- Ensanchamiento de la base o el fuste con sección no superior a 10 m².

Los elementos pueden trabajar aislados, formando grupos y configurando pantallas.

La perforación puede realizarse de forma continua, o discontinua, (hélice, cuchara, trépano, etc...) utilizando elementos de contención para estabilizar las paredes cuando el proceso de ejecución permita una forma geométrica definida:

El elemento configurado puede ser de:

- Hormigón en masa.
- Hormigón armado normal.
- Hormigón armado con armadura especial, tubos de acero, perfiles, elementos diversos o fibras de acero.
- Hormigón prefabricado, hormigón pretensado o tubos de acero en los que el espacio anular entre la pieza introducida y el terreno es rellenado con hormigón, lechada de cemento o lechada de bentonita-cemento.

1.6.1 Materiales utilizados en Pilotes Perforados

Con respecto a los materiales que componen los elementos que se están estudiando, se indican en este apartado las especificaciones que se consideran de interés.

1.6.1.1 Hormigón

Deberán poseer las siguientes características:

- Alta plasticidad y cohesión.
- Fluidez
- Capacidad de autocompactación.
- Trabajabilidad suficiente, para facilitar el proceso de vertido, y, en su caso, la retirada de entubados recuperables.

La resistencia de proyecto del hormigón se fijaba entre 20 y 35 N/mm², y debía cumplir:

- $C16 \leq f_{ck} \leq 30$ con probeta cilíndrica.
- $C20 \leq f_{ck} \leq 35$ con probeta cúbica.

La nueva instrucción de hormigón estructural, EHE, exige un valor de $f_{ck} \geq 25$ N/mm².

La consistencia del hormigón debe alcanzar valores diferentes atendiendo a las condiciones de uso.

Se puede utilizar hormigón de alta resistencia (C40 a C50) siempre que se especifique en el proyecto y sea compatible con las características del terreno y el proceso de ejecución.

1.6.1.2 Armaduras

Cuando se emplea como estabilizante una suspensión de bentonita, arcilla, o polímero, deben utilizarse exclusivamente armaduras construídas con redondos de acero corrugado.

La cuantía mínima de armadura longitudinal está relacionada con la sección transversal del pilote.

La armadura mínima longitudinal estará formada por 5 \emptyset 12 mm con separación < 200 mm.

La distancia mínima entre barras será igual al mayor de los siguientes valores:

- 1,5 veces el tamaño máximo de áridos.
- Diámetro máximo de la barra longitudinal.

La distancia libre entre barras, o grupos de barras, en una hilada, podrá reducirse al triple del diámetro de la barra o del diámetro equivalente del grupo de barra.

Si se hormigona bajo el agua la separación entre barras o grupos de barras longitudinales será 100mm.

La armadura transversal puede estar formada por estribos, cercos, armadura helicoidal o malla electrosoldada.

El recubrimiento normal o mínimo de las armaduras está relacionado con el diámetro del pilote, de modo que sigue las siguientes equivalencias.

\emptyset pilote > 0,6 m: recubrimiento = 60 mm

\emptyset pilote \leq 0,6 m: recubrimiento = 50 mm

El recubrimiento se incrementará a 75 mm en los siguientes casos:

- Terreno blando y ejecución sin entubado.
- Presencia de agua, con áridos de tamaño máximo 32 mm.
- Colocación de la armadura después de vertido el hormigón.
- Cuando la técnica utilizada sea la de entubado o con revestimiento no recuperable, el recubrimiento del hormigón puede reducirse hasta 40 mm.

1.6.2 Ejecución

La ejecución de los pilotes perforados en un medio cuyo conocimiento no es cierto conlleva una serie de riesgos relacionados con la presencia de agua incontrolada y del propio terreno.

Como consecuencia pueden producirse daños de los siguientes tipos:

- Hundimiento, alteración o inestabilidad del terreno resistente o del circundante.
 - Pérdida de capacidad portante de cimentaciones próximas situadas a un nivel superior, por socavación del terreno. Éste riesgo es superior en terrenos limosos, granulares y cohesivos blandos.
 - Daños al hormigón fresco de los pilotes ejecutados recientemente en el entorno.
 - Coqueas en el fuste durante el hormigonado.
 - Lavado del hormigón y arrastre de cemento y finos.
-

Los medios más comunes para evitar o reducir estos riesgos y contener la perforación son los siguientes:

- Entubación.
- Utilización de lodos de contención.
- Perforación con herramientas capaces de contener el terreno, como las barrenas continuas.
- mantener las aletas de la hélice rellenas de terreno.

1.6.2.1 Perforación continua y discontinua

La perforación puede ser continua o discontinua dependiendo de las herramientas utilizadas en la ejecución.

Las herramientas que habitualmente se emplean para la perforación discontinua son:

- Cuchara rotatoria (figura 1.22): accionado por Kelly para perforación giratoria discontinua. Usualmente equipada con hojas o dientes de corte y dotada de charnelas de fondo para retener el material excavado.
- Cuchara de almeja (figura 1.23): con dos o más para retirada discontinua del terreno o detritos de una perforación.
- Hélices (figura 1.24): compuesta por un eje, aletas helicoidales y borde o bordes cortantes, para perforación discontinua (accionada por Kelly) o continua (hélice continua).
- Trépano (figura 1.25): útil para romper obstáculos en la perforación de un pilote o para empotrar un pilote en un terreno duro o en roca.

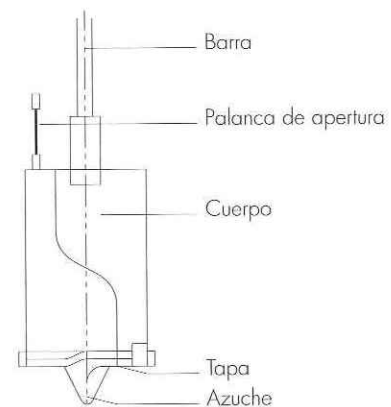


Figura 1.22: Cuchara rotatoria. Entubado con virola de corte

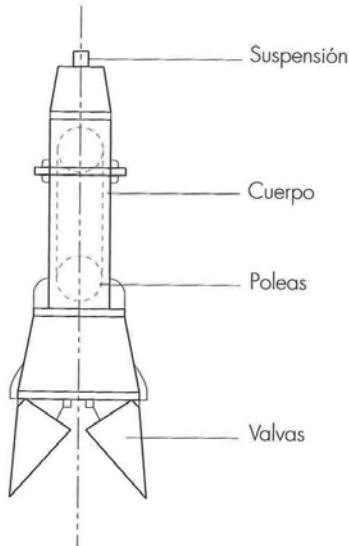


Figura 1.23: Cuchara de almeja

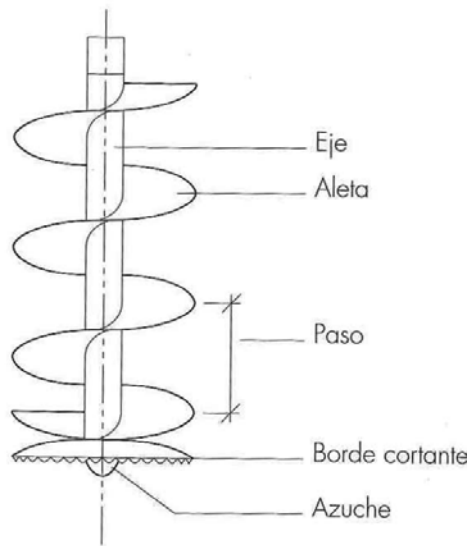


Figura 1.24: Hélice

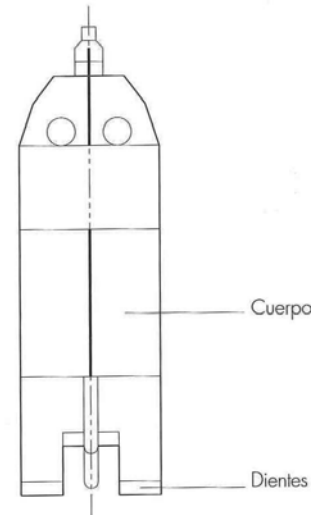


Figura 1.25: Trépano

Para perforación continua se utilizan las siguientes:

- Barrena continua.
- Herramientas de rotación.
- Herramientas de rotación y percusión; combinadas con técnicas de barrenado o lavado para retirada de terreno (figuras 1.26 y 1.27).

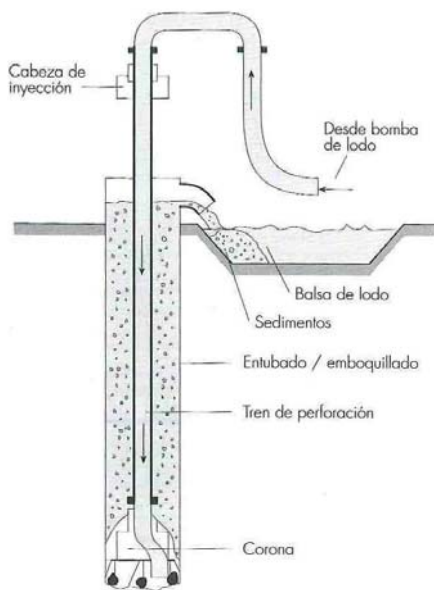


Figura 1.26: Perforación por circulación directa

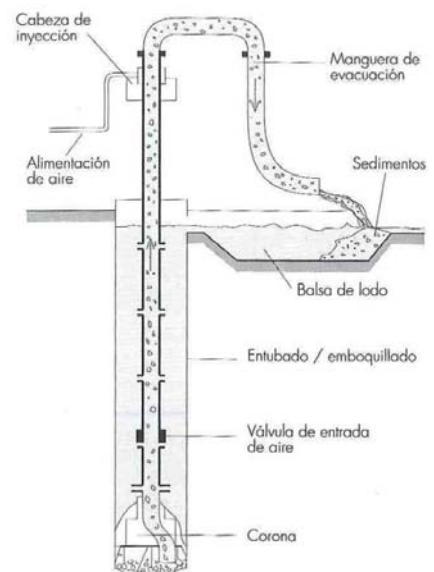


Figura 1.27: Perforación por circulación inversa

1.6.2.2 Perforación entubada

Los pilotes con inclinación se entubarán, a menos que se demuestre que la perforación no entubada es estable.

Cuando se utilicen entubamientos, la virola de corte situada en el pie del entubado será la mínima posible, aunque de entidad suficiente para garantizar una segura colocación y extracción del mismo.

Cuando la perforación se realice en niveles inferiores al freático se producirá dentro del entubado una presión no inferior a la de dicho nivel por medio de agua o de un lodo adecuado, que se mantendrá hasta que el pilote haya sido hormigonado. En terrenos inestables el entubado se hincará antes de realizar la perforación.

1.6.2.3 Perforación contenida mediante lodos

La boca de la excavación se protegerá mediante emboquillado o murete-guía con el objeto de guiar las herramientas de la perforación, proteger la perforación contra el desplome de terrenos sueltos, y garantizar la seguridad del personal de la obra.

Durante la perforación y el vertido del hormigón, se mantendrá en todo momento el nivel del lodo de contención dentro del entubado y del emboquillado o murete-guía: 1,5 m como mínimo por encima de la cota del nivel freático en secciones circulares, y 1,0 m en perforaciones tipo "barrete", para eliminar la subpresión originada por el nivel freático y mejorar en un caso la contención y en el hormigonado la auto compactación.

1.6.2.4 Perforación con hélice continua

La perforación con hélice continua o barrena continua exige que las aletas estén llenas de terreno en todo momento. La inclinación del pilote será inferior a 6° ($n < 10$).

El control de la ejecución de los pilotes incluirá las siguientes tareas:

- Registro en el tiempo real de la perforación del proceso rotación-penetración y del hormigonado.
- Control de la continuidad del pilote.
- Control continuo del consumo de hormigón.
- Control de la presión de hormigonado.

1.6.2.5 Perforación no entubada

Se puede prescindir de medidas de contención de las paredes de perforación en terrenos estables y no susceptibles de hundimiento.

La boca de la perforación se protegerá con emboquillado excepto en terrenos firmes y con diámetro $D < 0,6$ m.

No se deben realizar perforaciones sin entubamiento si la inclinación de la bisectriz es tal que $n \leq 15$.

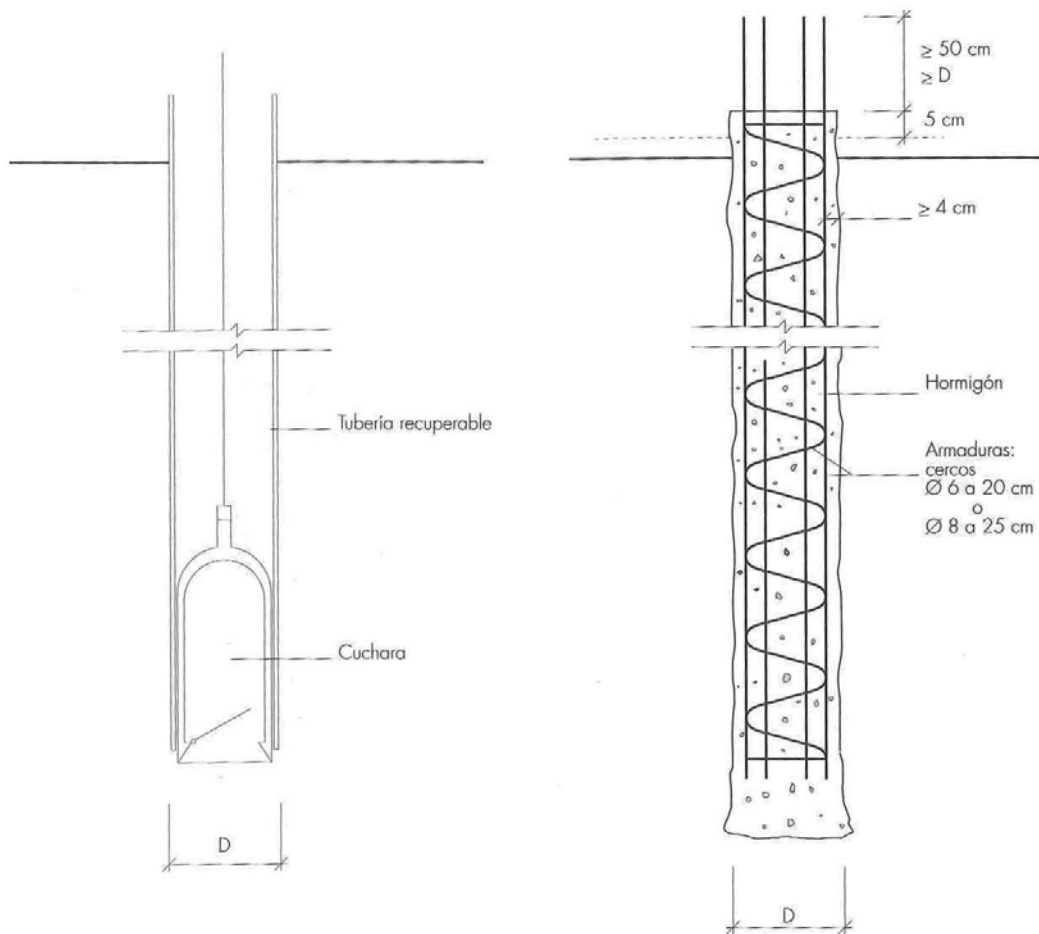


Figura 1.28: Pilotes perforados con entubación recuperable

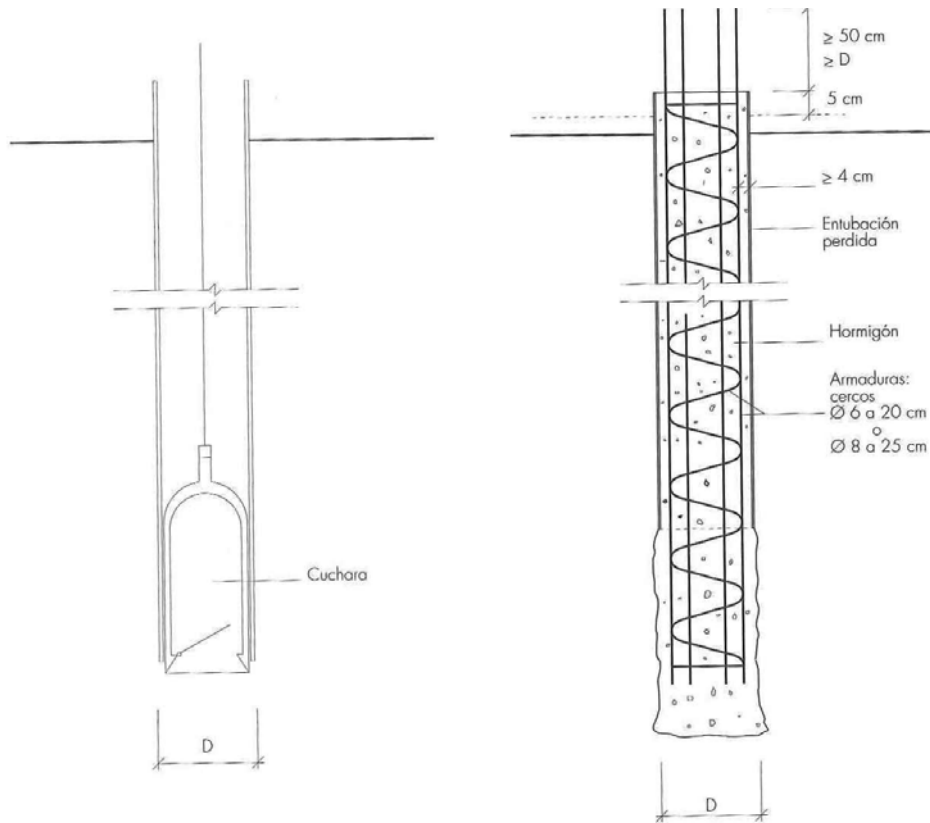


Figura 1.29: Pilotes perforados con camisa perdida

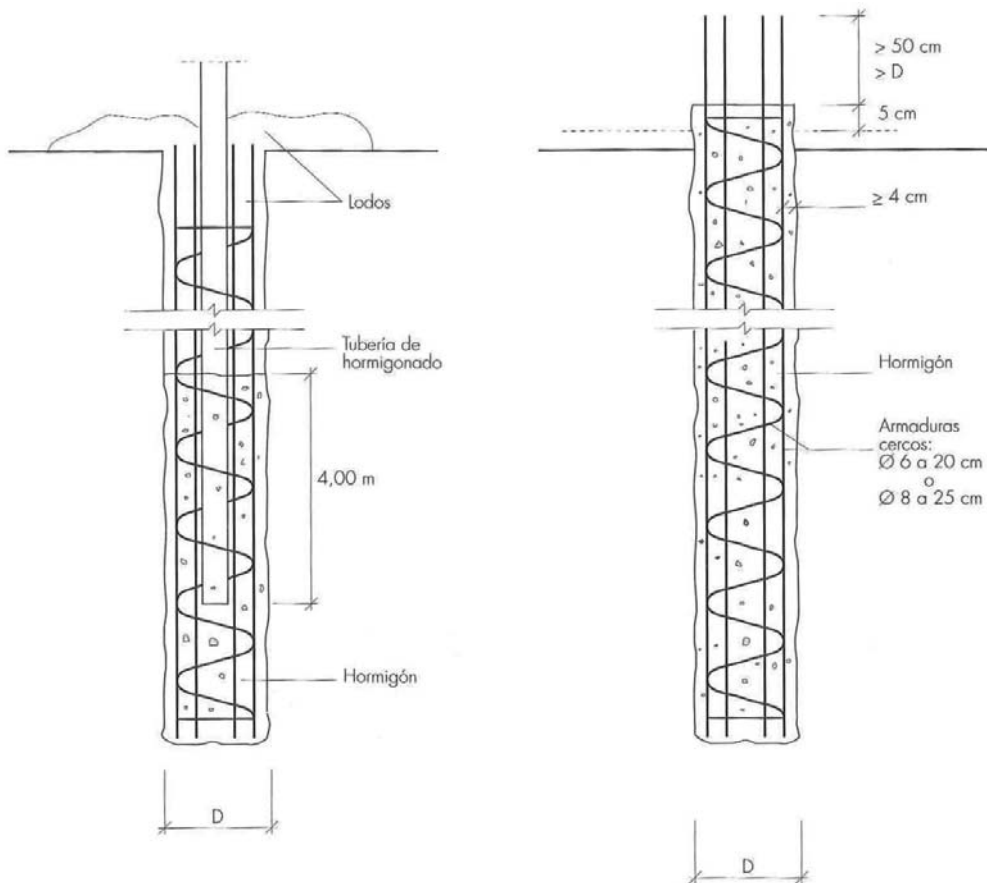


Figura 1.30: Pilotes perforados mediante lodos

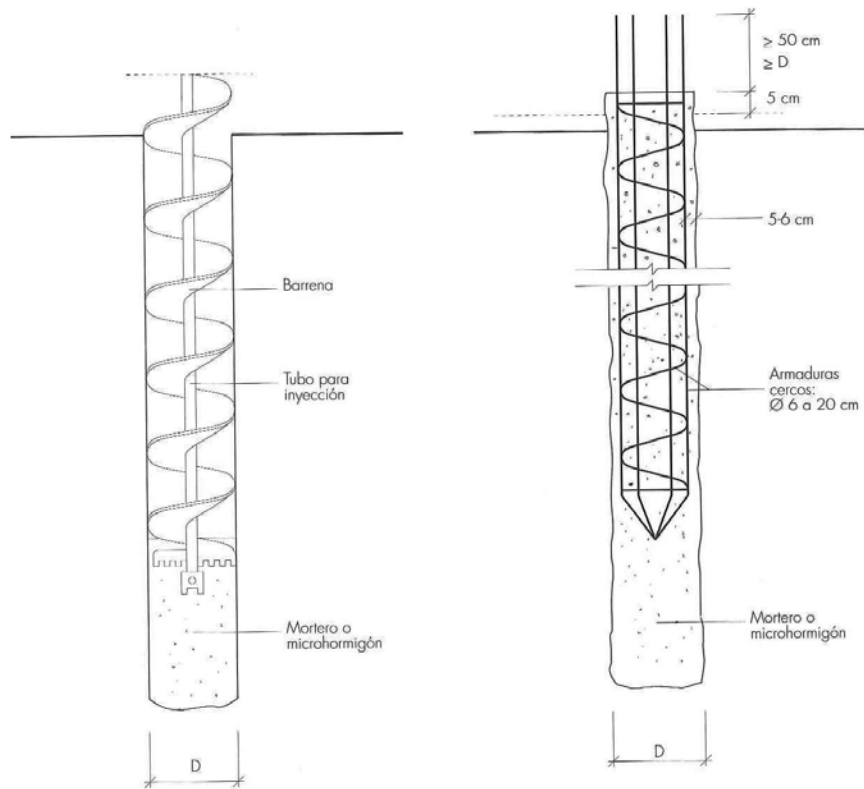


Figura 1.31: Pilotes perforados con barrena continua

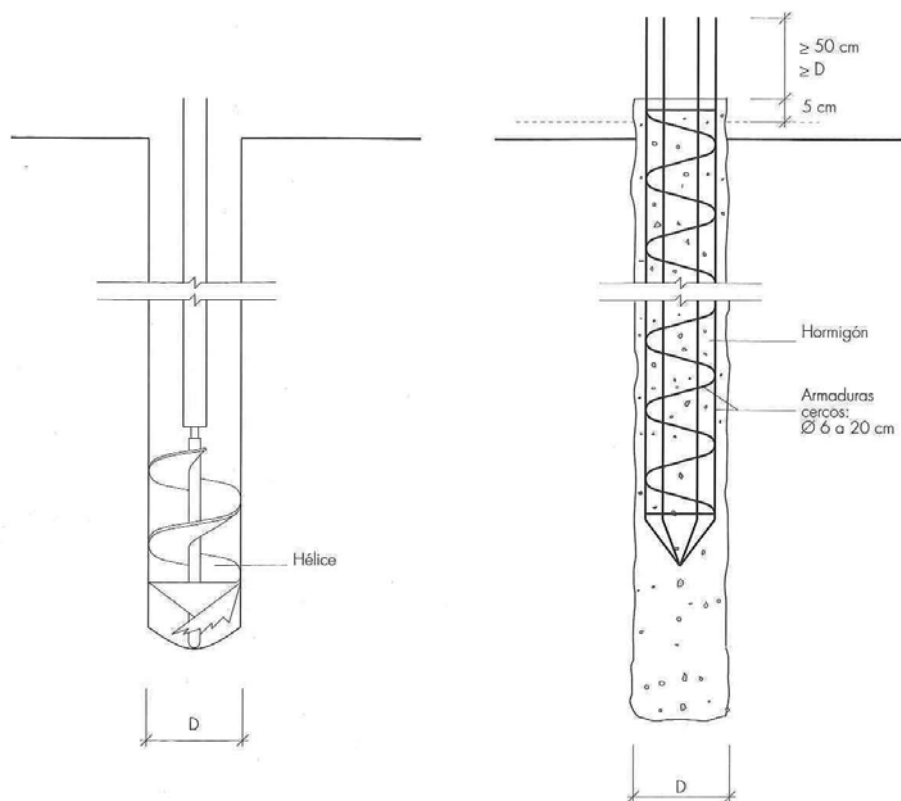


Figura 1.32: Pilotes ejecutados sin contención de la perforación

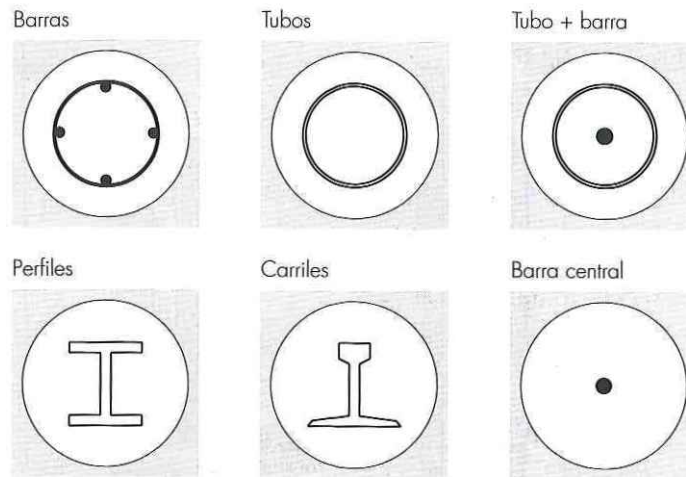


Figura 1.33: Métodos de armado de micropilotes

2. ENSAYOS DE INTEGRIDAD

2.1 ENSAYO DE INTEGRIDAD POR EL MÉTODO SÓNICO

2.1.1 Explicación del método de ensayo

Es el método más usado internacionalmente y consiste en golpear la cabeza del pilote con un martillo de mano y obtener mediante un acelerómetro el movimiento de la cabeza del pilote como consecuencia de la onda de tensión generada. Este método se denomina generalmente “método sónico”, aunque también puede llamarse “sísmico”, “ensayo de integridad de baja deformación” o “sonic echo” (eco sónico). Se aplica generalmente a cualquier tipo de pilote y no requiere ninguna preparación para la realización del ensayo. Para pantallas, zapilotes, o en general elementos que no su geometría no sea cilíndrica o prismática, no se asegura el correcto funcionamiento del ensayo para su posterior interpretación, debido a que no sabemos ciertamente si la onda de compresión que generamos, desciende verticalmente, o se producen rebotes de onda que nos darían interpretaciones equívocas de la realidad.



Figura 2.1: Equipo para el ensayo mediante el método sónico. Martillo, acelerómetro y ordenador.

2.1.1.1 Principios del método

El ensayo de integridad de pilotes por el método sónico, se basa en la propagación a lo largo del fuste del pilote, de una onda de compresión producida por un martillo de mano en la cabeza del pilote. El frente de onda que se genera en el punto de impacto realmente tiene forma esférica, pero a una distancia de unos 2 diámetros se puede considerar como un frente de onda plano que se transmite por el cilindro a una velocidad:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Siendo: E, el módulo de elasticidad dinámico del material
 ρ , la densidad
c, la velocidad de propagación

En el hormigón esta velocidad de propagación (c) varía entre los valores de 3500 y 4000 m/s, pudiendo ser mayor en el caso de los pilotes prefabricados.

Esta onda es reflejada por las discontinuidades del pilote, por la punta del pilote, por cambios de sección o por variaciones del tipo de terreno que lo rodea. La cantidad de energía que se transmite al terreno que rodea al pilote dependerá de la relación entre las rigideces del pilote y del terreno. Si el terreno que rodea al pilote es blando o suelto, como suele ocurrir en las condiciones en las que se cimienta con pilotes, una parte importante de la energía del tren de ondas se transmite a lo largo del pilote hasta que se disipa totalmente o encuentra un cambio geométrico o de material en el cilindro.

Cuando hay cambio geométrico o de características del material que se constituye el pilote o un cambio importante de la rigidez del terreno, parte de la energía se refleja hacia la cabeza de éste. El método se basa en el análisis de la onda que es reflejada hacia la cabeza del pilote. La onda reflejada permite obtener información de los cambios físicos que se ha encontrado la onda generada con el martillo al propagarse por el pilote. Se trata por tanto, de realizar un análisis de las ondas reflejadas causadas por cambios significativos en las propiedades del pilote o del terreno en que se sitúa.

Los cambios en las características geométricas o en las propiedades del material que lo constituyen y que producen ecos que permiten diagnosticar el estado del pilote son

el área de sección transversal del pilote, densidad del material y/o módulo de elasticidad o velocidad de transmisión de la onda en el material.

Estos aspectos se engloban en el término Impedancia y que se define como:

$$z = \rho \cdot c \cdot A$$

Siendo: z, la impedancia de una sección del pilote
 ρ , la densidad del material
c, la velocidad de propagación de la onda de compresión
A, el área de la sección transversal

La impedancia se puede también expresar como:

$$z = \frac{E \cdot A}{c}$$

Siendo: E, el módulo de elasticidad dinámico del material

Como la densidad suele variar relativamente poco de una zona a otra, aunque haya cambios importantes de las propiedades del material, los dos parámetros que más afectan al valor de la impedancia de la sección son c y A, y principalmente este último. Por lo tanto con las reflexiones del Eco se estarán registrando variaciones en la velocidad y sobre todo en el área transversal de los pilotes ensayados.

La onda es captada por un acelerómetro conectado a un ordenador portátil, que amplifica y digitaliza la señal mediante un sistema electrónico y se convierte en medida de velocidad, que se presenta inmediatamente en la pantalla para comprobar la correcta ejecución del ensayo, y se guarda en el disco duro del ordenador, para su posterior interpretación en gabinete.

2.1.1.2 Determinación de la profundidad

El gráfico de velocidad de propagación de la onda, a través del fuste de un pilote continuo, aparece en la pantalla como una línea relativamente horizontal, con dos picos, que indican el inicio causado por el impacto del martillo y el final del pilote, causado por la reflexión de la onda en el final del pilote, que es el primer cambio de impedancia que se produce. La reflexión que llega a la cabeza del pilote habrá recorrido una distancia $2L$, siendo L la longitud del pilote. Al registrar con un acelerómetro en la cabeza del pilote el tiempo, t , que ha tardado la onda en volver a la cabeza tras el impacto y se conoce la velocidad, c , de transmisión de las ondas de compresión en el hormigón (de 3500 a 4000 m/s como hemos dicho anteriormente), se puede calcular la longitud del pilote como:

$$L = \frac{c \cdot t}{2}$$

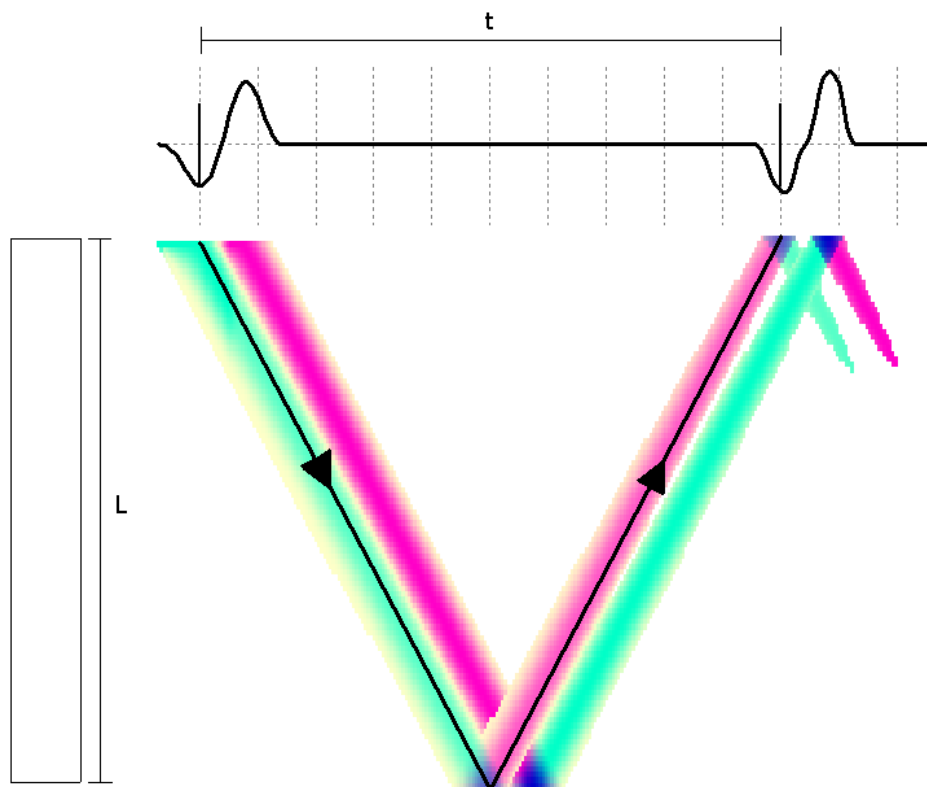


Figura 2.2: Curva teórica del método sónico

Si el pilote se encuentra en un terreno homogéneo y a una profundidad, h , se produce un cambio importante en la impedancia del propio pilote, bien producido por un cambio de sección (estrechamiento o bulbo), o por un cambio importante en las propiedades

del material, en el registro de movimientos de cabeza se producirá un reflejo a un tiempo, t' , tal que:

$$h = \frac{c \cdot t'}{2}$$

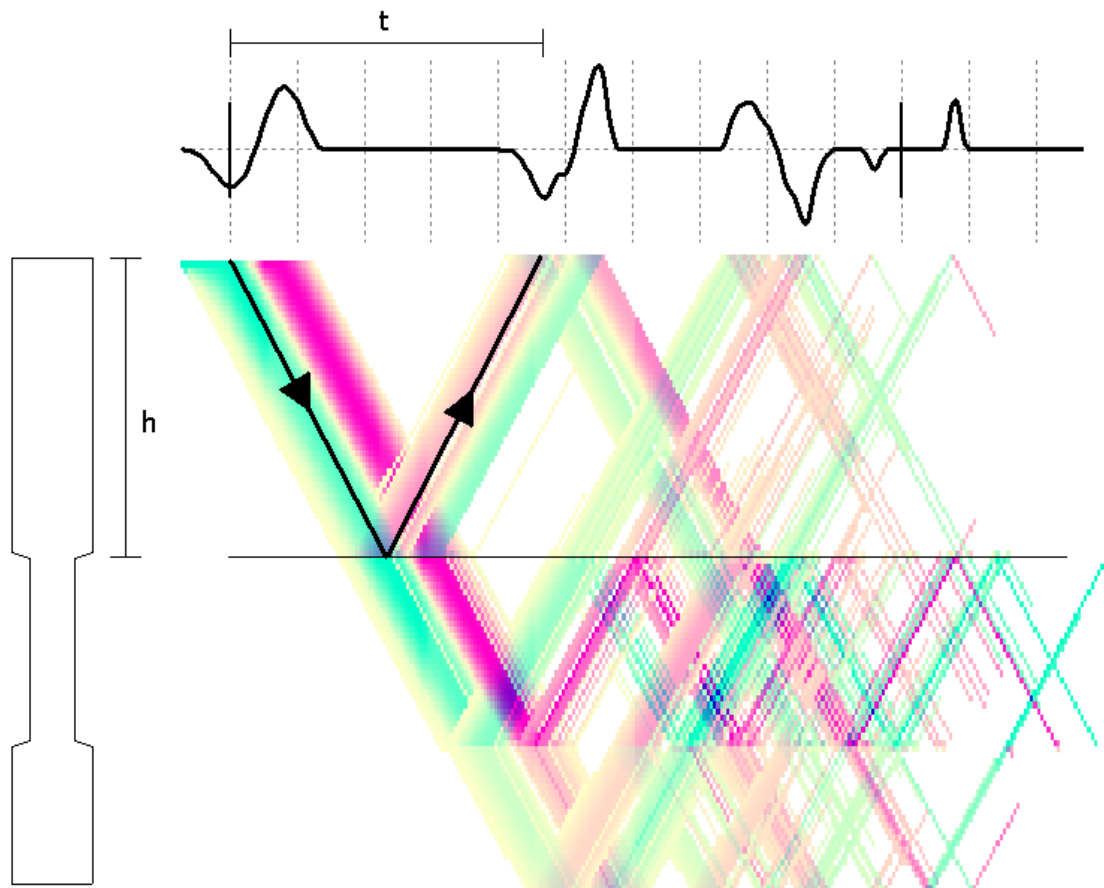


Figura 2.3: Curva teórica del método sónico para pilote con reducción de sección

El programa informático incorpora diferentes técnicas para mejorar y explotar las señales obtenidas, como suavizar, obtener una gráfica media de varios impactos de martillo y amplificar la señal de manera lineal o exponencial para compensar los efectos de pérdida de señal por la profundidad.

2.1.2 Ejecución del ensayo

2.1.2.1 Preparación del pilote para el ensayo

Para la realización de este ensayo, únicamente se requiere que la cabeza del pilote sea accesible en el momento del ensayo, sin presencia de agua, y que esté

correctamente descabezada. Se debe evitar que se produzcan fisuras y el hormigón debe ser sano, para que la onda no refleje en discontinuidades o coqueas del hormigón poco compacto existente en la cabeza del pilote antes de descabezar.



Figura 2.4: Fisura en un pilote descabezado, donde no se pueden obtener resultados de ensayo.

En general, el método de ensayo no obtiene datos para profundidades mayores de 30-40 diámetros, o incluso menos en terrenos arcillosos duros, por lo que pudiera suceder que en algún pilote más esbelto solo se obtenga información de la parte superior.

La edad del hormigón recomendada para la realización del ensayo, es de 7 días, para garantizar un grado de endurecimiento y un módulo de elasticidad que permita que la onda se propague.

La realización del ensayo por el método sísmico, es rápida y en condiciones óptimas, se puede obtener un rendimiento de 100 pilotes al día.

2.1.2.2 Realización del ensayo en obra

Una vez se ha preparado el pilote para ser ensayado, se limpia con una escobilla de mano y se coloca el acelerómetro sobre una superficie horizontal de la cabeza del pilote, procurando que quede lo más vertical posible, y comprobaremos con el martillo que sea una zona compacta de hormigón.

Indicamos en el programa informático el nombre de referencia del pilote y la profundidad esperada de proyecto. Sujetamos con firmeza el acelerómetro y lo conectamos a través del programa. Acto seguido, con el martillo de mano, golpeamos suavemente la cabeza del pilote, hasta que obtengamos gráficas suficientes que nos aporten información para su interpretación. Los golpes deben ser suaves y secos, y preferentemente siempre en el mismo lugar. Cada golpe de martillo, nos da una gráfica.

De todas las graficas obtenidas, el programa hace una grafica que es la media de todas, y cuando detecta que por más gráficas que hagamos, la media no varía, nos indica que podemos parar de golpear el pilote. Procedemos a interrumpir la lectura del acelerómetro por parte del programa, para poder dejar de sujetarlo con firmeza, ya que si lo moviéramos sin desconectarlo, nos produciría gráficas erróneas.

Observamos la gráfica media obtenida, y nos aseguramos de que ésta no tenga demasiadas oscilaciones, y que nos da un resultado de profundidad aproximado al que esperábamos. Si la gráfica obtenida tiene muchas oscilaciones, no nos da un final claro, o nos detecta una anomalía en el pilote, podemos repetir el ensayo para asegurarnos. Se puede repetir colocando el acelerómetro en otra parte de la cabeza del pilote, ya que en ocasiones, por el descabezado o por coqueras u otro problema similar en la zona donde hemos colocado el acelerómetro, podría dar graficas con anomalías que en realidad no existen.

Una vez tengamos unas graficas válidas, procedemos al guardado de la información para su posterior interpretación en gabinete.

2.1.2.3 Influencia del terreno de cimentación

El principio del ensayo sónico se basa en el análisis de las ondas reflejadas por cambios significativos en las propiedades del pilote. También tiene influencia el entorno geotécnico en los resultados obtenidos por esta técnica y las variaciones en las propiedades del pilote.

- Atenuación:

La dificultad del análisis de señal con estas técnicas proviene de que la amplitud de la onda generada por el impulso con el martillo en la cabeza y que se transmite a lo largo del pilote para volver a la cabeza se atenúa, complicando la recepción y análisis de resultados. La atenuación se produce principalmente por la disipación de la energía en el terreno que rodea el pilote. Esta disposición de energía afecta a la amplitud de la

onda que se refleja, imposibilitando a veces detectar la señal reflejada desde el fondo de éste.

La atenuación de la señal depende de la esbeltez del pilote, es decir de la relación longitud/diámetro (L/D) y de la rigidez del terreno. En terrenos blandos o sueltos pueden interpretarse bien los registros de pilotes con esbeltez de hasta 30:1 o superiores, e incluso en la bibliografía se describen resultados buenos con esbeltez de 60:1 en suelos aluviales. Si el terreno es rígido puede ser muy difícil analizar los registros de pilotes con esbeltez incluso inferiores a 20:1.

- *Cambios de impedancia:*

Aparte de la atenuación, los cambios de impedancia en el propio pilote serán los que dificulten el análisis de resultados, pero a la vez serán los que nos proporcionen información del estado de integridad. Las variaciones de impedancia son las que nos darán información del estado del pilote. Para que sean detectables con estas técnicas y los equipos empleados, las variaciones de impedancia deben ser al menos de un 20%.

La variación puede ser debida tanto a un aumento como a una disminución de impedancia. Se pueden detectar normalmente variaciones de Impedancia de un 20% lo que supone por ejemplo una reducción de diámetro de entorno del 10% sobre la sección o también variaciones en la velocidad de propagación del hormigón del orden del 20%. Realmente detectar cambios menores es difícil de observar ya que no se aprecian variaciones significativas.

La técnica de integridad por el método sónico, no es capaz de detectar cambios graduales de impedancia. Es evidente que del análisis de los resultados no se podrá proporcionar información ni sobre la verticalidad del elemento ni sobre la capacidad portante del pilote.

2.1.3 Interpretación de resultados

En el caso de un reflectograma ideal de Eco, si el pilote se encuentra empotrado en roca o terreno resistente, es diferente del reflectograma que obtendríamos si el empotramiento fuera libre. En el primer caso, la curva que indica el final del pilote, indica distinta polaridad que el impacto inicial de martillo, mientras que en el caso de empotramiento libre, tiene la misma polaridad. Por tanto, en el reflectograma para los dos casos la curva inicial sería hacia abajo, y la curva final, sería hacia arriba en el

caso de un pilote empotrado, y hacia abajo en el caso de un pilote de empotramiento libre.

De igual manera se puede entender para un ensanchamiento o estrechamiento de pilote. En un ensanchamiento se produce el efecto similar a un pilote empotrado, que aumenta la sección por donde viajan las ondas, y al igual que en el empotramiento cambia la polaridad, lo que se traduciría en una curva hacia arriba. En un estrechamiento, la polaridad es la misma, por lo que la curva sería igual que un empotramiento libre, hacia abajo, ya que disminuye la sección por donde pasan las ondas.

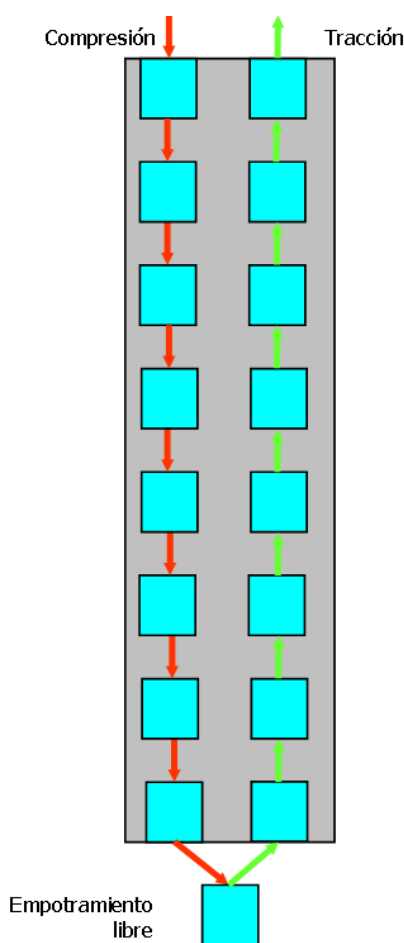


Figura 2.5: Comportamiento de ensayo en un pilote con empotramiento libre

Suponiendo nuevamente que tenemos un caso de un pilote continuo, si pensamos en la onda que producimos al golpear con el martillo, se podría hacer la similitud a una pequeña partícula que recibe una fuerza de compresión en la cabeza del pilote. Esta partícula, ejerce la misma fuerza de compresión a la partícula inmediatamente inferior, y así sucesivamente hasta llegar al final del pilote. Si el pilote tiene un empotramiento libre, la última partícula que recibe la fuerza de compresión, al no tener otra partícula por debajo, hace una fuerza de tracción a la partícula que tiene inmediatamente superior, y ésta a su superior, y así hasta llegar a la cabeza del pilote, donde tenemos el acelerómetro. Por tanto con el golpe de martillo producimos que la partícula se desplace hacia abajo, y en el retorno de la onda, también se desplace hacia abajo.

En el caso contrario, en que tenemos el pilote empotrado en terreno duro, con el martillo producimos en la partícula de la cabeza del pilote una fuerza de compresión. Al llegar a la última partícula del pilote, hay otro material duro que impide que se desplace hacia abajo, por lo que la fuerza de compresión, vuelve a subir hacia arriba, empujando a las partículas hasta que llegamos a la última partícula en la cabeza del pilote, donde tenemos el acelerómetro, que recibe una fuerza de compresión hacia arriba. Es decir, la primera partícula siempre se desplace hacia

abajo al golpear con el martillo, y obtenemos la curva inicial hacia abajo en el reflectograma. El movimiento de partículas que sube hacia arriba, dependerá de si el

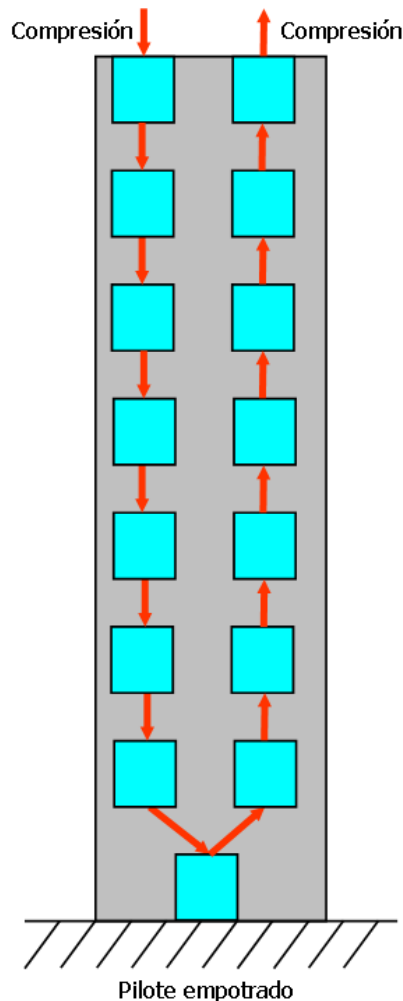


Figura 2.6: Comportamiento de ensayo en un pilote empotrado

pilote tiene final libre (que sube una fuerza de tracción que provoca que la partícula de debajo del acelerómetro se desplace hacia abajo y obtenemos la curva hacia abajo en el reflectograma) o de si el pilote tiene un final empotrado (caso en el que la fuerza que sube es de compresión y provoca que la partícula de debajo del acelerómetro se desplace hacia arriba, y obtenemos la curva del reflectograma hacia arriba).

2.1.3.1 Anomalías detectadas en los reflectogramas

El técnico especialista responsable del ensayo debe facilitar los resultados finales y la evaluación de la integridad de los pilotes, al menos en forma de avance de informe en 48h como máximo, para poder tomar decisiones antes de que avancen los trabajos de cimentación.

Para cada pilote ensayado se facilitará una gráfica con al menos tres curvas en el dominio de tiempo (velocidad en función del tiempo) o la curva media de las mismas, correspondientes a diferentes golpes de martillo.

Otros datos generales a incluir en el informe definitivo son el nombre de la obra y localización, tipología de pilotes ensayados, diámetro, longitud, sistema constructivo, edad del hormigón o cualquier otro dato que pueda aportar información.

2.1.3.2 Interpretación de las anomalías como defectos físicos de pilotes

Los pilotes que presenten 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 aceptados. Cuando no se aprecia una reflexión clara de la onda sónica en la punta, cosa que puede suceder en pilotes muy esbeltos, el técnico especialista establecerá hasta que profundidad el ensayo puede considerarse significativo.

Si se aprecian reflexiones significativas o anomalías de la onda por encima de la punta del pilote, el técnico especialista tratará de dar una interpretación evaluando los posibles fallos en el pilote. Para ello se podrá auxiliar de informaciones facilitadas por el constructor, la dirección facultativa u otros agentes que intervengan en el proceso constructivo. Si la evaluación realizada concluye que el fallo reduce significativamente la capacidad estructural del pilote, este será calificado como defectuoso. En el caso de gráficas de ensayo complicadas, que no permitan llegar a una conclusión clara, el pilote será calificado como cuestionable.

2.1.3.3 Acciones correctoras

Los pilotes calificados como defectuosos o cuestionables, pueden ser aceptados, reparados o sustituidos por otros, a criterio de la dirección facultativa.

Los pilotes calificados como cuestionables pueden ser sometidos a pruebas y ensayos complementarios, tales como pruebas de carga estáticas o dinámicas, sondeos con recuperación de testigo continuo del hormigón o excavación perimetral si los defectos no están a gran profundidad.

Las acciones correctoras pueden consistir en inyecciones a presión a través de perforaciones en el hormigón del pilote, en micropilotes perforados dentro del pilote, u otras.

En el caso de defectos en la parte superior del pilote, se puede demoler dicha zona y volver a reconstruir. En todos los casos se puede volver a realizar el ensayo sónico de los pilotes reparados.

2.2 ENSAYO DE INTEGRIDAD POR EL MÉTODO ULTRASÓNICO

Este método de ensayo consiste en hacer descender por dos tubos huecos paralelos en el interior del fuste del pilote o pantalla, un emisor y un receptor que envían y reciben señales, registrando el tiempo que tardan estas señales en recorrer la distancia entre ellos. Es también un método dinámico que induce una baja deformación en el pilote,



Figura 2.7: Equipo de registro de datos para el método ultrasónico Cross-Hole.

denominándose generalmente “Cross-Hole ultrasónico”, aunque también se le denomina “sondeo sónico”, “sondeo sísmico”, “ensayo sísmico paralelo”, “cross-hole sonic logging” o “ensayo por transparencia sónica”. Este ensayo se debe prever con anterioridad a la ejecución del elemento, ya que requiere que se dejen dos o más tubos embebidos en el hormigón o de lo contrario no se puede ensayar por este método.

2.2.1 Explicación del método de ensayo



Figura 2.8: Sondas emisora y receptora de señal ultrasónica

El método, como se ha dicho en la introducción del ensayo, se basa principalmente en el tiempo que tarda una onda ultrasónica en recorrer la distancia entre emisor y receptor a través del hormigón. Dichos emisor y receptor, se desplazan simultáneamente por dos tubos paralelos sujetos a la armadura del pilote, realizando un barrido desde la parte inferior del pilote o pantalla, hasta el borde superior de los tubos.

El tiempo medido es función de la distancia entre emisor y receptor y de las características del medio atravesado. También se registra la calidad de la señal que se recibe. La profundidad se mide mediante una rueda conectada al ordenador, a través de la cual pasa el cable de las sondas, y va girando a medida que las izamos.

En un hormigón homogéneo, la velocidad de propagación de las ondas de presión es constante y varía entre 3500 y 4000 m/s dependiendo de la calidad del hormigón. Esta velocidad disminuye notablemente en zonas con diferentes características del material, como hormigón de baja resistencia, coqueas, inclusiones de terreno, etc., al presentar un mayor tiempo de transmisión.

Durante el recorrido a lo largo de los tubos, la sonda emisora produce una serie de pulsos de alta frecuencia, generalmente entre 20 y 130 kHz y

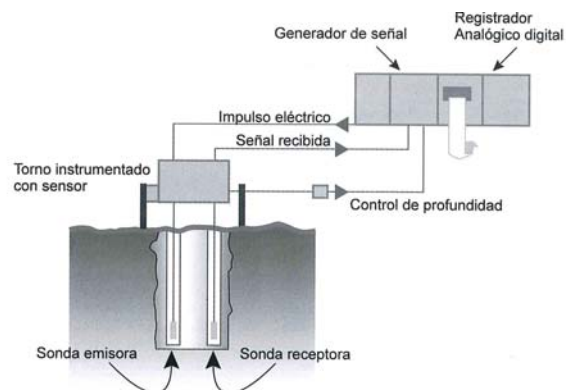


Figura 2.9: Esquema del funcionamiento del Sistema Cross-Hole

que producen trenes de ondas a intervalos verticales, comúnmente cada 10 a 50 mm. La unidad de control registra cada una de las señales que llegan a la sonda receptora y las almacena para su posterior tratamiento y presentación. De esta forma se obtiene un registro casi continuo a lo largo del fuste del pilote que permite determinar a cualquier profundidad si el hormigón es homogéneo o tiene heterogeneidades.

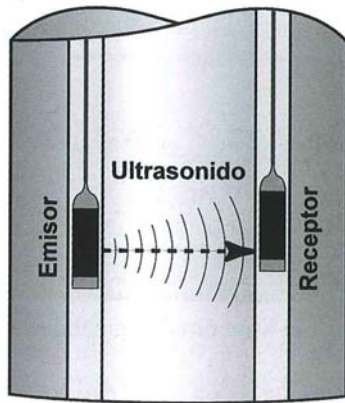


Figura 2.10: Esquema de medida entre emisor y receptor

Las señales registradas se tratan con un postproceso para generar una diagraffía como superposición de las distintas llegadas a diferentes profundidades. Dependiendo del equipo de control que se utilice, el registro del tren de ondas a cada profundidad puede tratarse sencillamente seleccionando el tiempo de llegada de la señal, para representarlo en un registrador, o bien modularse el tren de ondas en una serie de zonas blancas y negras.

En los equipos digitales actuales, se almacena la señal digitalizada completa recibida a cada profundidad, pudiendo tratarse posteriormente. La diagraffía registrada puede presentar retrasos o irregularidades que se interpretan como anomalías y que indican la presencia de posibles defectos.

En el caso de existir defectos en el camino de las ondas tales como inclusiones de tierra, oquedades, coqueras u otros que hagan alargar el tiempo de recorrido, en la gráfica del ensayo queda reflejada la variación y la profundidad a la que se ha producido esta anomalía.

Los datos son almacenados de manera digital en el equipo, y las gráficas pueden ser impresas directamente en la obra, si se dispone de los medios para ello, o revisadas e impresas en gabinete.

El equipo de Transparencia Sónica o Cross-Hole está compuesto por:

- dos sondas piezoeléctricas emisora y receptora de ultrasonidos
- por una unidad de control constituida por un generador de impulsos, un osciloscopio, y un sistema de registro, visualización y almacenamiento de las señales

- un registrador de profundidad que puede ser un torno instrumentado sobre un trípode o ir instalado en las propias bobinas y que se coloca próximo a la pantalla o pilote. Este elemento se utiliza para izar las sondas a lo largo de los tubos y para controlar la profundidad en donde se efectúa el ensayo. El torno sirve como disparo o “trigger” del pulso sónico-ultrasónico en el sistema de registro de datos.
- Unas bobinas de cable para conectar tanto las sondas como el torno con la unidad de control y que además sirven como elemento de sustentación de las sondas.

2.2.2 Requisitos para la ejecución del ensayo

Para la realización del ensayo se precisa que en los pilotes o pantallas, el constructor deje instalados tubos para poder introducir las sondas hasta la profundidad que se quiera ensayar. Los requisitos de los tubos son los siguientes:

- Los tubos deben ser de acero, con diámetro interior mínimo de 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 no ofrezcan buena adherencia al hormigón debido al calor desprendido en el fraguado.



Figura 2.11: Pilote con previsión de tubos para el ensayo Cross-Hole

- Los empalmes entre tubos deben realizarse 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 deben cerrarse herméticamente por medio de tapones metálicos, para impedir la entrada de elementos extraños y para evitar la pérdida de agua que deben contener durante el ensayo. Los extremos superiores deben también cerrarse para evitar la caída accidental de material

hasta el momento de realización del ensayo. Sobresaldrán al menos 40 cm del hormigón del elemento a ensayar.

- Los tubos deben llenarse de agua dulce limpia previamente al ensayo, y deberá comprobarse que no tienen obstrucciones, no se producen pérdidas de agua.
- El número de tubos por pilote recomendados por la norma ASTM D 6760 es 3 tubos hasta 60 cm de diámetro y de un tubo adicional cada 30 cm más de diámetro (3 hasta diámetro 60 cm, 4 hasta diámetro 90 cm, etc.). La norma francesa DTU 13.2 admite dos tubos para diámetros de pilote inferiores o iguales a 60 cm. Para pantallas, los tubos se deben colocar en las dos caras más longitudinales de la sección horizontal del pilote, siendo recomendable un mínimo de 4 colocadas al tresbolillo, no dejando una distancia mayor a 1 m entre tubos consecutivos.

El ensayo se realiza según las normas NF P 94-160-1 y ASTM D 6760.

2.2.3 Ejecución del ensayo

Para la realización del ensayo, el hormigón no tendrá, en general, menos de una semana en el momento del ensayo.

Es recomendable disponer de un plano con la identificación de los pilotes o pantallas, su longitud aproximada, e información sobre posibles incidencias durante su construcción.

Previamente al inicio del ensayo de cada elemento, se medirá la longitud del tubo sobresaliente del hormigón y las distancias entre tubos, y se hará un croquis de la situación de los mismos, para posteriormente poder identificar los perfiles de ensayo, y saber en qué punto concreto del pilote, se encuentra una anomalía si la hubiese.

En pilotes con 4 tubos, se realizarán 6 ensayos, cuatro en las parejas de tubos adyacentes y dos en las parejas de tubos diagonalmente opuestos.

El ensayo se realiza introduciendo las sondas emisora y receptora en los tubos que se hayan instalado previamente en los pilotes o pantallas a ensayar.

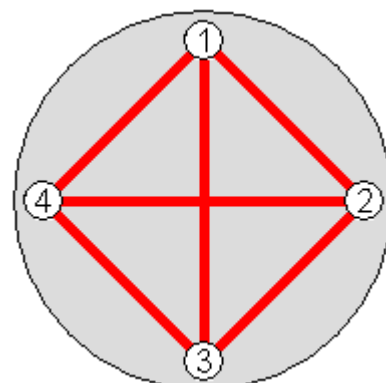


Figura 2.12: Perfiles ensayados mediante Cross-Hole en un pilote con 4 tubos

Las sondas se introducen por los tubos previstos, llenos de agua dulce, y se descienden hasta que una de las dos sondas llegue al final del tubo, procurando que queden al mismo nivel, aunque una de ellas no llegue al final del tubo. Entonces se izan uniformemente, mientras el software informático registra el tiempo y la energía de la señal a intervalos constantes de profundidad, que se calcula mediante una rueda, por la que pasan los cables de las sondas, y mide el recorrido de los mismos.

En condiciones óptimas, se pueden realizar más de 130 m de ensayo a la hora.

2.2.4 Interpretación de resultados

Para cada pareja de tubos en que se haya realizado el ensayo se facilitará una gráfica (diagrafía) del perfil ensayado, en la que figurará en ordenadas la profundidad y en abscisas el tiempo que tardan en llegar las ondas ultrasónicas del emisor al receptor. También es recomendable incluir en la gráfica una curva que indique la energía relativa de la onda cuando llega al receptor.

La velocidad de propagación en un hormigón con buenas características depende de las propiedades intrínsecas del medio y de la geometría del elemento, pero también de la longitud de onda del pulso que se emite. Esta longitud de onda viene definida por los equipos, pero tendrá que ser considerada a la hora de realizar análisis de detalle.

Una anomalía en un ensayo de transparencia sónica se entenderá como una irregularidad o una serie de irregularidades observadas en una diagrafía sónica (incremento en el tiempo de llegada) y que indica la presencia de un posible defecto. Realmente el análisis consiste en describirla y desvelar las características del defecto.

El análisis se realiza con el tiempo de llegada, pero valorar la amplitud amortiguamiento de la señal sónica

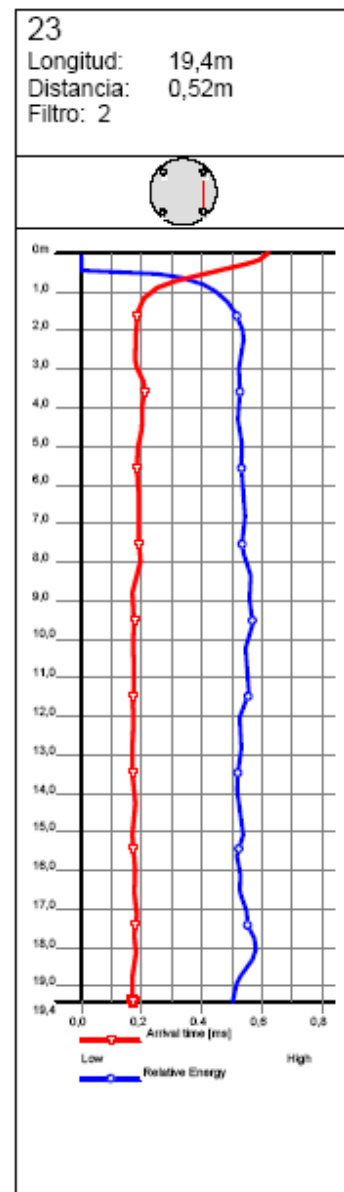


Figura 2.13: Diagrafía de perfil ensayado entre 2 tubos

complementa la información para poder diferenciar entre posibles anomalías o simples problemas en la toma de datos.

En la transmisión del pulso ultrasónico entre la sonda emisora y la receptora se producen reflexiones y resonancias en la señal registrada al atravesar materiales con distinta impedancia como la cerámica de la sonda, el agua del tubo, el metal y el hormigón. Esto hace que en algunas ocasiones la señal presente ruidos que habrá que filtrar.

Realmente la primera llegada del pulso ultrasónico corresponderá al camino que le permita viajar lo más rápido posible a través de los materiales que atraviesa. No se puede determinar si la señal ha atravesado el material con menor impedancia de una heterogeneidad o ha realizado un rodeo alrededor de ésta antes de la llegada a la sonda receptora. En el resultado final del ensayo se detecta un incremento en el tiempo de llegada sin poder discriminar entre las alternativas anteriores.

La diagrafía deberá identificarse con unas cotas de referencia precisas para situarla apropiadamente en profundidad, marcando cual es la distancia entre los tubos de auscultación ensayados y si estas distancias se mantienen en profundidad.

Se considera que un elemento no presenta anomalías cuando el tiempo de llegada registrado en una diagrafía es sensiblemente constante con la profundidad. Un incremento local en el tiempo de llegada puede considerarse como una anomalía y puede ser debido, según se indicaba anteriormente, a la presencia de un defecto en la trayectoria de la señal, bien provocado por el mayor recorrido de ésta al bordear la irregularidad, o bien por atravesarla con una velocidad inferior a la del hormigón sano.

En cada gráfica se mostrarán también datos identificativos como fecha de ensayo, nombre de la obra, identificación del pilote ensayado, identificación del perfil ensayado en cada caso, y planos o cualquier otro documento que aporte la información necesaria para la localización de posibles anomalías.

2.2.4.1 Anomalías detectadas en las diagrafías

El técnico especialista responsable del ensayo debe facilitar los resultados finales y la evaluación de la integridad de los pilotes, al menos en forma de avance de informe en 48h como máximo, para poder tomar decisiones antes de que avancen los trabajos de cimentación.

Para cada pilote o elemento ensayado se facilitará una gráfica por perfil ensayado, indicando al menos la línea de tiempo y de energía relativa o atenuación.

Otros datos generales a incluir en el informe definitivo son el nombre de la obra y localización, tipología de pilotes ensayados, diámetro, longitud, sistema constructivo, edad del hormigón o cualquier otro dato que pueda aportar información.

2.2.4.2 Interpretación de las anomalías como defectos físicos de pilotes

Los pilotes que presentan una gráfica uniforme de tiempo de llegada de la onda ultrasónica en toda su altura y en todos los perfiles ensayados, pueden ser aceptados.

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, el técnico especialista tratará de dar una interpretación evaluando los posibles fallos en el pilote. El número y posición de perfiles que tienen una determinada anomalía a una misma profundidad puede dar una indicación de la zona afectada en planta. Se podrá auxiliar de informaciones facilitadas por el constructor, la dirección facultativa u otros agentes que intervengan en el proceso constructivo. La interpretación concluirá con una estimación de la gravedad del fallo en el pilote detectado.

3. DEFECTOS FÍSICOS DE PILOTES

3.1 PROBLEMAS DE CONSTRUCCIÓN DE LOS PILOTES

En este apartado, se analizarán los problemas más usuales que suelen ocurrir durante la construcción de los pilotes, para después, poder interpretar las posibles anomalías que se obtengan en los ensayos, como defectos físicos de pilotes, ya que si partimos de saber cuáles son los defectos más frecuentes que se dan, también será más fácil llegar a una interpretación más exacta.

Los tipos de defectos que pueden producirse en los pilotes o pantallas son muy diversos: roturas en la cabeza, estricciones o reducciones de sección, bulbos, cortes de hormigón no homogéneo, desplazamientos de armaduras, etc. y pueden ser producidos por diferentes causas. Se realiza un repaso sobre las causas más corrientes que producen los defectos y sobre todo de las posibilidades de detección que presentan los distintos métodos de auscultación. En definitiva, se trata de relacionar las causas con los defectos detectados.

3.1.1 Roturas en cabeza de los pilotes

Las roturas en cabeza de pilotes, suelen producirse por la propia maquinaria de pilotar, al desplazarse por la superficie del terreno o por cualquier otra maquinaria pesada. También se puede producir rotura en la cabeza, al descabezar el pilote con maquinaria excesivamente potente, o simplemente por un mal descabezado.

Este tipo de defecto es fácil de observar mediante cualquiera de los tipos de ensayo, ya que se encuentra a poca profundidad. Si los pilotes se ensayan mediante "Cross-Hole", antes de realizar el descabezado, se corre el riesgo de que la rotura se produzca después de realizar el ensayo, pero por otro lado, no conviene efectuar el ensayo después de descabezar los pilotes o pantallas, ya que se podría deteriorar el tubo por el que deben pasar las sondas, y no podríamos realizar el ensayo. En cambio, para el método sínico, es un requisito principal que los pilotes se encuentren ya descabezados en el momento de ensayo, por lo que no se correría el riesgo de que se produjera rotura posterior.

3.1.2 Cortes de hormigón

Cuando decimos que se ha producido un corte de hormigón, nos referimos a que el elemento ha quedado dividido en 2 partes, existe un vacío de hormigón en la sección del pilote que elimina la continuidad de todo el pilote como un único elemento.

Estos cortes o vacíos de hormigón, pueden producirse por falta de abastecimiento de hormigón, por un descenso significativo de la fluidez del hormigón durante el proceso de hormigonado o por tapones en el tubo de hormigonado que obliguen a elevar el tubo por encima de la cota de hormigón o al maniobrarlo para facilitar el flujo del hormigón en el entorno próximo del tubo. Con estas incidencias se ocasiona una discontinuidad y una zona con hormigón contaminado generalmente importante. Este tipo de defecto se detecta sin problemas con el método "Cross-Hole" con exactitud en la profundidad a la que se ha producido el defecto. También pueden detectarse con el método sónico, siempre que el corte sea significativo, con variaciones en la calidad de los materiales y espesores perceptibles y la profundidad a la que se encuentren estén en los límites de investigación del método.

3.1.3 Estricciones, estrechamientos o cuellos de botella

Estas anomalías, deben entenderse como una reducción significativa de sección, sin que este deje de ser continuo completamente. Mediante el ensayo de integridad, se pretende averiguar la situación de la anomalía para posteriormente evaluar la gravedad.

Es un defecto que puede presentarse en los pilotes ejecutados con camisa recuperable, cuando la superficie de la entubación que se extrae tiene una textura rugosa y produce un arrastre en el contacto.

También se producen si el hormigón presenta un falso fraguado en el contorno del pilote. Esto provoca un rozamiento importante al arrastrar el hormigón en contacto con al entubación, lo que genera estrechamientos en el fuste del pilote. Este tipo de defecto se detecta fácilmente en los barridos perimetrales de Cross-Hole. También se puede detectar con el ensayo por el método sónico si la reducción de sección es superior al 25%, dependiendo del entorno geotécnico.

Estas pérdidas de sección se producen asimismo si se trabaja con un hormigón poco fluido debido a que no es capaz de arrastrar el lodo de perforación, especialmente si

éste presenta un contenido elevado de arena, o el posible material desprendido de las paredes, formando inclusiones débiles en el pilote.

Reducciones de sección, aunque no tan significativas como para llamarlas estricciones o estrechamientos, se pueden producir por falta de recubrimiento de las armaduras en el contacto con el terreno, al estar el pilote muy armado y además incorporarle tubos de auscultación o por trabajar con un hormigón de consistencia inadecuada. En este sentido se deberán considerar las exigencias de la EHE y el CTE y en especial el artículo del PG-3 referente a las armaduras de los pilotes. Ésta será una incidencia detectable con el ensayo Cross-Hole si afecta a la sección entre tubos, pero que en especial deberá evitarse al realizar el ferrallado de la armadura y la instalación de tubos, procurando que sean del menor diámetro posible, lo que evitará el efecto barrera que provocan frente al paso del hormigón.

3.1.4 Desprendimientos de material en el fondo de excavación o en niveles intermedios

Los desprendimientos de material en el fondo de la excavación o en niveles intermedios se pueden producir por varias razones. Una de las situaciones comunes en las que se pueden producir estos desprendimientos es durante la excavación y hormigonado de pilotes en seco sin empleo de entubación, especialmente cuando en terrenos arcillosos existen intercalaciones de arenas. También se pueden producir desprendimientos con el empleo inadecuado de lodos bentoníticos que no mantienen la estabilidad de las paredes.

Pueden producirse también estos defectos con empleo de entubación recuperable, especialmente bajo el nivel freático y con empleo de trépano. En estas condiciones, al retirar la tubería recuperable pueden formarse inclusiones que afecten a la integridad del pilote. A este respecto el PG-3 indica:

“Durante el hormigonado de los pilotes de entubación recuperable, se irá elevando dicha entubación de modo que quede siempre un tapón de hormigón en el fondo de la misma, del orden de dos diámetros, que impida la entrada del terreno circundante”

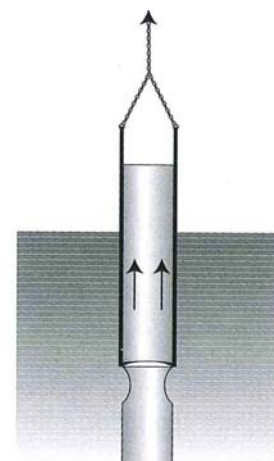


Figura 3.1: Defecto al extraer la entubación

Otra situación en la que se dan estos defectos es en los pilotes excavados y hormigonados con barrena continua, en los cuáles la armadura se hinca posteriormente pudiendo rozar con las paredes de la excavación, lo que produce las consiguientes inclusiones.

También pueden aparecer sedimentos bajo la punta de los pilotes por decantación del material en suspensión en el agua o lodo de perforación.

El mejor método para detectar desprendimientos y sobretodo en punta es el Cross-Hole, si éstos afectan a los trayectos que se investiga. Se pueden detectar las profundidades entre las que se sitúa la inclusión y su situación en planta con mucha precisión. Con el ensayo sónico se observarán las inclusiones si el derrumbe provoca una variación de sección significativa. Es imposible, sin embargo, evaluar la extensión y situación en planta de la inclusión que se produzca.

En el caso de que haya varias heterogeneidades por desprendimientos a distintas profundidades, en función de cual sea la sección afectada por cada una de ellas, mediante el método sónico, se podrán detectar varias o sólo la de menor profundidad y será difícil valorar en sección su afectación real a la integridad del pilote.

Los depósitos en el fondo de excavación son detectables mediante Cross-Hole. Para analizar si el comportamiento del pilote en punta es de tipo empotramiento o libre en punta se podrían utilizar el método sónico si la esbeltez es adecuada.

3.1.5 Lavado de finos del hormigón

Lavados de finos del hormigón se producen al hormigonar a través del agua acumulada en el fondo de la excavación, sin haber descendido convenientemente el tubo de hormigonado hasta el fondo de la excavación. También se pueden producir deslavados en el hormigón en pilotes con camisa recuperable en zonas de aluviones por debajo del nivel freático. Si el caudal de agua es muy importante al izar la entubación se puede producir un deslavado del hormigón que suele ser incluso difícil de reparar posteriormente.

Este tipo de defecto, si afecta al hormigón situado entre los tubos de auscultación, se detecta con Cross-Hole que permite conocer con bastante precisión la zona afectada. Con el método sónico se podrá también detectar la cota superior donde comienza la anomalía al haberse generado una discontinuidad en los valores de impedancia que es muy significativa. Realmente no se podrá conocer su extensión en profundidad pero

estas incidencias son tan importantes con una variación de calidad del hormigón tan marcada, que es necesario realizar investigaciones complementarias posteriores para poder repararlas adecuadamente.

3.1.6 Los defectos en punta del pilote

Los defectos en punta del pilote se pueden producir por varias de las causas mencionadas anteriormente: desprendimientos durante la colocación de las armaduras, deslavado del primer vertido en contacto con el fluido, segregación del primer hormigón vertido, sifonamiento del fondo, etc. Sin embargo, los más frecuentes se deben a la falta de limpieza del fondo de excavación o a sedimentos que ya no es posible extraer ni mediante técnicas de desarenado o “air lift” ni pueden ascender en su totalidad durante el hormigonado. Este tipo de defectos solamente pueden ser puestos de manifiesto con el empleo del método Cross-Hole y sólo si los tubos han sido colocados hasta el fondo de la excavación.

El artículo 671 del PG-3 indica en referencia a la limpieza del fondo de perforación que en *“pilotes de entubación abierta, se procederá, inmediatamente antes del comienzo del hormigonado, a una limpieza muy cuidadosa del fondo del taladro”* proponiendo soluciones si la sedimentación es importante. Así mismo, se deberá realizar adecuadamente el desarenado en pilotes con lodos.

3.2 CLASIFICACIÓN DE DEFECTOS-CAUSAS

Los defectos que se han descrito y que pueden ser detectados con las técnicas no destructivas atienden realmente a unas causas determinadas. Determinar las causas que los han provocado, tras haber sido detectados, es sencillo sólo si existe un parte de hormigonado y perforación para conocer la “historia constructiva” del mismo. Las empresas de control generalmente no disponen del proyecto, ni de los partes de hormigonado, ni de los sondeos realizados previamente al proyecto, lo que hace que en la mayoría de los casos se tengan que limitar a una descripción de los defectos, sin poder precisar las causas que los han provocado.

Los tipos de defectos tan diversos descritos anteriormente, como roturas en la cabeza, estricciones, cortes, desprendimientos, puntas contaminadas, etc. Pueden ser producidos por diferentes causas en distintos tipos de pilotes, presentando

posteriormente las mismas características cuando se realiza una excavación alrededor del pilote o un sondeo con recuperación de testigo.

Los defectos se podrían englobar en los siguientes grupos:

1. Defectos relacionados con problemas constructivos
2. Defectos relacionados con la excavación
3. Defectos provocados por una inadecuada manipulación de la camisa
4. Defectos debidos a una mala utilización de lodos bentoníticos
5. Producidos en la fase de hormigonado

1. Defectos relacionados con problemas constructivos

Dentro de este grupo de defectos los más comunes son los provocados por manipulación del tubo de hormigonado. Se incluirán también las roturas en cabeza producidas por maquinaria pesada o por el propio movimiento de la maquinaria de pilotar.

Los defectos anteriores pueden producirse en cualquier tipo de pilotes. En el caso de los barrenados habría que eliminar los defectos de manipulación del tubo de hormigonado, al hormigonarse con un tubo central continuo e incluso en muchos casos realizar un registro de presiones de inyección, pero habría que considerar como específicos los que pudieran deberse a su procedimiento concreto de hormigonado y a la hincada de la armadura.

Dentro de los defectos provocados por problemas constructivos se incluirán otros que ya no son tan comunes, o que las nuevas técnicas han provocado su desaparición, como el hormigonado con caída libre, la excavación de un pilote próximo a otro recién hormigonado, etc.

2. Defectos relacionados con la excavación

Dentro de éstos se pueden considerar los relacionados con las condiciones del terreno, por lo que en general son defectos que pueden subsanarse con el empleo del método adecuado de excavación y sostenimiento y con el uso de una determinada maquinaria. Un estudio geotécnico previo con suficiente detalle también permitirá prevenir este tipo de defectos.

Generalmente algunos de estos defectos que afectan a la excavación pueden ser subsanables si se conocen a priori, con una buena técnica de hormigonado, quedando reducidos a un problema puntual de mayor volumen de hormigón sobre el normal de la sección teórica. Esta situación, que puede detectarse con el ensayo Cross-Hole, deberá estar reflejado en el parte.

3. Defectos provocados por una inadecuada manipulación de la camisa

En este apartado se incluirán solamente los defectos existentes en los pilotes de extracción con entubación recuperable y que están provocados por la manipulación de la camisa, excluyendo los debidos al hormigonado, limpieza insuficiente del fondo, etc., que se producen al igual que en los otros tipos de pilotes. Al contrario de lo que generalmente se piensa y aunque se realice la excavación y el hormigonado con camisa, estos pilotes son están exentos de defectos. Es importante prestar la mayor atención en el control de los pilotes con camisa recuperable, ya que suelen realizarse generalmente de gran diámetro y utilizarse como pila-pilote sin existir reparto de cargas con otros pilotes del encepado.

Defectos muy comunes en estos pilotes son los provocados por avanzar con la excavación por delante de la camisa. En la figura 3.2 se representa un posible proceso de formación de una pérdida de sección en un pilote ejecutado con camisa recuperable.

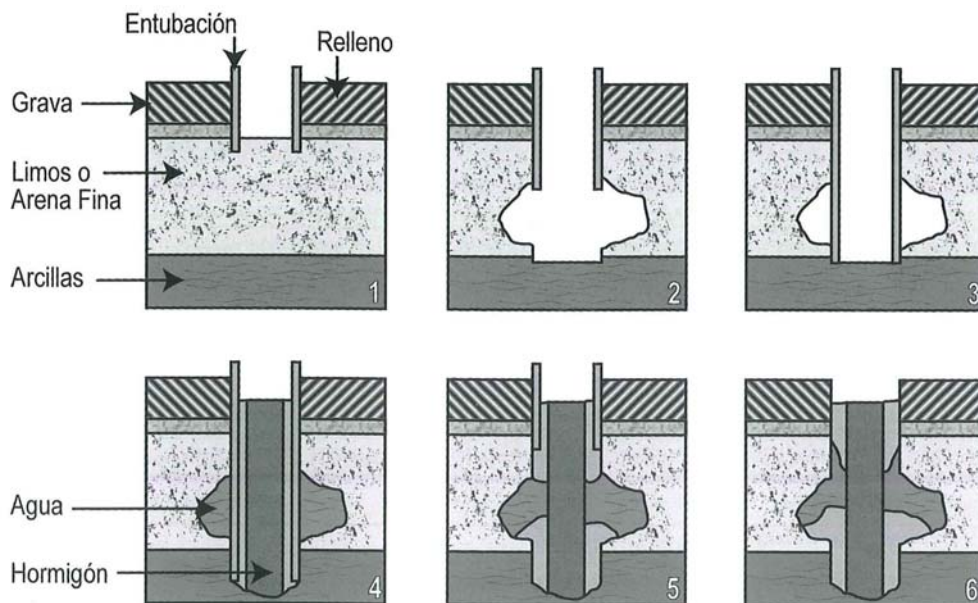


Figura 3.2: Defecto en pilote ejecutado con camisa recuperable

En los pilotes con camisa recuperable, en ocasiones, no se requiere que se entube hasta la punta, cuando se considera que el terreno en punta es estable. En el ensayo por el método Cross-Hole se muestran ligeras diferencias en la velocidad de propagación entre la altura del pilote que estaba entubada y la que no. Estas ligerísimas diferencias son provocadas por los movimientos en las paredes del pilote durante la extracción de la camisa en la zona superior y no deben interpretarse como defectos.

4. Defectos resultado de una mala utilización de lodos bentoníticos

Los defectos asociados a pilotes excavados utilizando lodos bentoníticos suelen estar provocados e incluso los controles de integridad permiten confirmar su homogeneidad.

La utilización inapropiada de los lodos puede producir importantes sedimentaciones en el fondo de excavación por decantación que no es posible extraer con el hormigonado, defectos intermedios y caídas de las paredes, todos ellos defectos que aparecen en otros tipos de pilotes. Además pueden producirse bolas de bentonita que permanecerán flotando en el hormigón o exceso de apelotonamiento de bentonita en estratos granulares que pueden producir importantes estricciones.

5. Relacionados con la fase de hormigonado

Son causas comunes de defectos relacionados con la fase de hormigonado las siguientes:

- Suministro irregular de hormigón que puede incluso llegar a producir un fraguado antes de lo previsto dentro el tubo de hormigonado o en el entorno de la armadura si existe entubación.
 - Puesta en obra de hormigón mal formulado, con baja trabajabilidad o fácilmente segregable. En el caso, utilizar hormigones con baja trabajabilidad también se producen defectos en el recubrimiento de las armaduras.
 - Evolución de la consistencia del hormigón en el tiempo lo que conlleva una inapropiada trabajabilidad del hormigón durante toda la fase del hormigonado, en ocasiones debido al empleo de aditivos destinados a mejorar la trabajabilidad del hormigón a corto plazo.
 - Inapropiada la técnica de hormigonado con tubería tremie y hormigón sumergido.
 - Excesiva separación entre tubos tremie en el hormigonado de pantallas.
-

Realmente es interesante conocer en qué condiciones se producen defectos (por una estructura geotécnica compleja, por problemas constructivos, por el uso inapropiado de soluciones de cimentación, por cuestiones postconstructivas, etc...) para decidir cuántos pilotes se ensayan.

Los daños provocados por un descabezado inadecuado o por el movimiento de maquinaria alrededor de los pilotes, son poco frecuentes en España, y sólo se han observado en obras en las que para el descabezado de pilotes con barrena continua se utilizó maquinaria muy potente y los pilotes no estaban armados en cabeza. Por otro lado, los defectos relacionados con la contaminación en los 2 primeros metros se eliminan generalmente con el descabezado hasta la cota de proyecto. Estos últimos se identifican claramente con el método del Cross-Hole y no se suelen observar en los pilotes ensayados por el método sónico, ya que este método requiere que los pilotes se encuentren descabezados al realizar los ensayos.

Hay que señalar que los defectos en el fuste por caída de material, coqueras o contaminación, son más comunes a pesar de que la sección afectada en la mayoría de los casos no alcanza una cuarta parte de la sección del pilote. Los defectos más abundantes en cualquier tipo de pilotes de extracción, son los defectos en punta.

3.3 DISTINCIÓN ENTRE ANOMALÍAS, FALLOS Y DEFECTOS

Lo que se ha explicado en este apartado 3 son los defectos más comunes que se suelen producir en pilotes y pantallas, defectos físicos que podemos obtener en el elemento construido.

Ahora vamos a explicar la diferencia entre estos tres sustantivos, que es básico para poder hablar con propiedad de lo que nos encontramos cuando se realizan ensayos no destructivos de pilotes o pantallas.

- **ANOMALÍA:** Cuando decimos que al obtener los resultados de ensayo, ya sea por el método Cross-Hole o por el método sónico, se observa una anomalía, se refiere a que en la gráfica de ensayo que se obtiene, se observa una variación gráfica que se sale de lo que sería normal. Entonces no debemos referirnos a que un pilote tiene una anomalía, sino que se obtiene una anomalía en la gráfica, que posteriormente deberemos estudiar para intentar explicar que pasa físicamente en el pilote o pantalla.

- **FALLO:** Un fallo es lo que se encuentra físicamente en un pilote, obtenido a partir de la interpretación de una anomalía en una gráfica de ensayo.
- **DEFECTO:** Cuando los posibles fallos físicos encontrados, son de gran tamaño o por su localización pueden afectar a la capacidad resistente del elemento, decimos que se produce un defecto.

Así la diferencia entre anomalía, fallo y defecto, reside en que la anomalía se observa gráficamente en los resultados de ensayo, y esta anomalía se traduce físicamente en un fallo del elemento, o un defecto si por sus características puede afectar a la capacidad resistente del elemento.

En general, el método Cross-Hole es el método que permite localizar el mayor número de defectos y el único que con el uso de un número adecuado de tubos permite delimitar la situación de los defectos. Si el estado de la punta del pilote es importante para el comportamiento de la cimentación, el Cross-Hole es el que proporciona la mejor información, aunque también es susceptible de errores sobre todo si los tubos no han sido extendidos hasta el final de la armadura.

Hasta ahora se han clasificado los defectos por las causas que los producen. Una clasificación de defectos que atiende más a lo que se obtiene de los ensayos que se realizan en pilotes y pantallas y no tanto a la ejecución, es la siguiente:

1. *Cambios en la forma del pilote produciéndose ensanchamientos o estrechamientos.* Estos cambios están relacionados generalmente con el entorno geotécnico en el que se encuentra el pilote (Figura 3.3).

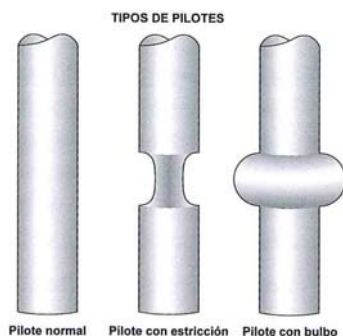


Figura 3.3: Cambios de la forma en los pilotes

2. *Ruptura total del pilote por una interrupción en todo el cuerpo del pilote.*

Se trataría de roturas planas o discontinuidades que afectan a toda la sección o provocados por ejemplo por descabezados inadecuados (Figura 3.4). También se pueden producir por



Figura 3.4: Cortes en el pilote

deslavados importantes del hormigón provocados por caudales de agua altos. Otra causa posible es la existencia de esfuerzos laterales o tracciones no previstos durante o tras la ejecución. Se incluyen además las intrusiones provocadas por desprendimientos que afecten a toda la sección y las juntas provocadas por la interrupción del hormigonado o elevación de la entubación recuperable y levantamiento o maniobrado del tubo tremie.

3. *Cambios en las propiedades internas del pilote.* Se trataría de los defectos producidos exclusivamente por el hormigón o en el hormigonado. Los cambios



Figura 3.5: Variaciones en la calidad del hormigón

en las propiedades del hormigón o la presencia de inclusiones pueden ser tanto progresivos como acusados (figura 3.5). También puede producirse por procesos de degradación del hormigón, ataque químico del hormigón o del acero o deslaves.

4. *Punta.* Se trataría de un caso especial del apartado 3 cuando se localiza en el fondo del pilote. Este defecto se detecta con el método Cross-Hole.
5. *Superficie del fuste.* En ocasiones se producen defectos solamente de borde en el contacto pilote-suelo con falta de recubrimiento de armaduras. Dado que no afectan tanto como una estricción se les debería dar un tratamiento aparte. Este tipo de defectos puede tener repercusión en el comportamiento a largo plazo de las armaduras, especialmente en pilotes o módulos de pantalla previstos para trabajar a flexión. Son defectos difíciles de detectar con las 2 técnicas propuestas en este documento.

3.4 ANÁLISIS DE DEFECTOS

Los defectos detectados, por los métodos no destructivos, tendrán consecuencias más o menos graves para el comportamiento de los pilotes o pantallas en la obra, según la importancia de las zonas afectadas. Por supuesto hay que analizar los defectos a corto plazo, pero también considerar la durabilidad de la estructura.

Como en cualquier unidad sobre la que se realiza un control, habrá que tener en cuenta las condiciones técnicas de ejecución y los riesgos adquiridos en el diseño. Además se deberán considerar los costes que se generan en una reparación y si en cualquier caso es mejor sustituir los pilotes por otros. Esto será más difícil en el caso

de pilotes de diámetro importante en encepados reducidos, por lo que es muy importante analizar cuáles son los resultados obtenidos con los métodos no destructivos.

El análisis realmente será, al fin y al cabo, cualitativo y por comparación con otros pilotes ensayados anteriormente en función del criterio del ingeniero que interpreta los resultados.

Es muy importante la capacidad del técnico que interpreta los ensayos, ya que debe cruzar la información procedente de éstos con otros datos, como por ejemplo las condiciones de ejecución, el terreno, las condiciones geotécnicas, requerimientos en cuanto a cargas de diseño, etc... Estas técnicas realmente no deberían ser el único factor para rechazar o aceptar una cimentación. Debe existir un plan de reparación, un aumento de muestreo con otros ensayos si es necesario o la posibilidad de modificaciones en la cimentación ejecutada en el caso de que se detecten problemas serios.

3.5 INSPECCIONES COMPLEMENTARIAS-REPARACIONES

Las soluciones que se pueden adoptar ante un defecto en un pilote son muy variadas. Desde un simple recálculo de la cimentación, redistribuyendo las cargas en los otros pilotes íntegros del encepado y permitiendo mayores esfuerzos, hasta la construcción de un pilote colindante o próximo al defectuoso. La anomalía puede estar producida por un bulbo que no afecte en absoluto al comportamiento de la cimentación y no requiera ningún tipo de reparación, o puede estar producida por un hormigón deslavado por flujo de agua, que no pueda ser solucionado por procedimientos convencionales y se requiera la construcción de otro pilote.

Cuando se detecta una heterogeneidad, la primera pregunta es si la zona presuntamente defectuosa está a poca profundidad, o quedará accesible en algún momento como en el caso de las pantallas continuas. Los defectos confirmados mediante excavación a poca profundidad pueden subsanarse con descabezados complementarios, saneos, recrecidos, etc...

Cuando no sea sencillo realizar una excavación alrededor por encontrarse el defecto detectado profundo, y se necesite confirmar las características del material que lo compone, se pueden realizar sondeos con recuperación de testigo. Como condiciones generales, se puede indicar que estos sondeos tienen que realizarse evitando la

vibración del varillaje. Así mismo, habrá que evitar realizar maniobras a las profundidades de inspección, extrayendo en la medida de lo posible todo el espesor de la heterogeneidad en un testigo entre dos maniobras. La descripción del testigo y valoración del material extraído tiene que correr a cargo de personal especializado, ya que el testigo no representará fielmente el estado del material en la propia heterogeneidad, al haber sido afectado por la propia perforación y extracción. De esta forma, el empleo de agua en la perforación favorecerá la pérdida de finos en materiales ya deslavados de por sí.

Para inspeccionar el sondeo en toda su profundidad y en especial en la zona afectada por la anomalía, es muy interesante y da muy buenos resultados con un bajo coste descender una cámara de TV o video por el sondeo realizado. Este tipo de inspecciones evita en parte la incertidumbre generada por las irregularidades del testigo del sondeo, es posible analizar la permeabilidad y descarga en profundidad de la anomalía, pudiendo valorarse la continuidad de la misma y en su caso la inyección que se ejecutará.

Las inyecciones permiten tratar un gran número de los defectos que se detectan con las técnicas no destructivas, pero hay cortes de pilotes que pueden repararse por ejemplo con barras o micropilotes en su interior y habrá que estudiar cada caso.

Las inyecciones pueden reparar hormigones en los que se hayan producido deslavados de cemento, consolidar un suelo en punta que haya sido alterado por la excavación y que posteriormente no se ha hormigonado adecuadamente y reparar fisuras o coqueras.

Es importante definir adecuadamente los siguientes parámetros:

- Procedimiento de inyección
- Fases
- Tipo de lechada
- Presión de inyección y dosificación
- Volumen de inyección por fase

La presión es función de la reparación que haya que hacer, ya que no será la misma si se trata de rellenar huecos en varios puntos del fuste, o de consolidar el terreno en punta y posteriormente realizar un recálculo de la cimentación. El parámetro presión se deberá regular en función del tipo de defecto en el pilote, pudiendo variar si se pretende rellenar un hueco o reparar un hormigón deslavado. Así mismo en el caso de

la mejora del terreno deberá ajustarse para tratar el volumen de material previsto. En este caso se deberá matizar si se deben producir roturas del terreno.

El tipo de lechada o mortero, al igual que la presión dependerá del tipo de reparación pudiendo utilizarse lechada de cemento, de bentonita-cemento, etc.

Las fases se deberán definir en especial en el caso de que se traten de inyecciones de tubo-manguito.

En lo que se refiere a la ejecución de la inyección y sus fases, debe asegurarse que se ha realizado adecuadamente, pudiendo efectuarse ensayos a posteriori para confirmar el comportamiento del material en la zona reparada.

CONCLUSIONES

En vista del estudio realizado de ensayos de integridad estructural de pilotes, en general, se puede concluir que dichos ensayos aportan información adicional útil para conocer el estado de la cimentación. No obstante, debido al diferente funcionamiento de los dos métodos, se deben hacer dos conclusiones, una para el ensayo por el método de integridad Sónica y otra para el método de integridad "Cross-Hole".

En cuanto a la integridad por el método sónico, es un ensayo fácil y económico, pero por el contrario, a parte de que solo es aplicable en pilotes, la complejidad de interpretación en algunos casos puede ser verdaderamente difícil, como en el caso que obtengamos unos reflectogramas que nos deriven a un pilote con problemas en el inicio, estas curvas obtenidas se repiten continuamente hasta el final, ocultando los problemas que pueda haber en profundidades inferiores.

Así mismo, en casos en los que el terreno tenga cambios de estrato con densidades diferentes, los reflectogramas aparecerán con anomalías que deberemos descartar las que son debido al terreno y las que son físicamente del pilote, cosa que es bastante difícil.

En conclusión, el método sónico de integridad de pilotes, es muy útil si un pilote está correctamente ejecutado y no se encuentran problemas, se puede certificar fácilmente que la integridad del pilote es continua en toda su longitud. Por el contrario, en pilotes en los que se obtengan demasiadas anomalías, es muy difícil saber que es lo que realmente está pasando "in situ", y puede llevarnos a interpretaciones erróneas de la realidad. En definitiva, es un ensayo bastante impreciso.

En cuanto al ensayo de integridad por el método "Cross-Hole", es mucho más fiable y se puede aplicar en cualquier elemento en el que se hayan previsto tubos para el ensayo.

Al tratarse de un emisor y un receptor que se introducen en el interior del pilote o pantalla, nos aseguramos que la señal ultrasónica viaja exclusivamente entre estas dos sondas, que en teoría debe ser hormigón. Por este motivo, no tiene influencia en el ensayo el tipo de terreno que lo rodee.

Con este método es más fácil y rápido la interpretación de una anomalía encontrada en las diagráfias, ya que lo que se mide es el tiempo de llegada de la señal desde el emisor al receptor, que debe ser igual a todo lo largo del perfil entre dos tubos ensayados.

Cuando en un punto del perfil, la señal varía su tiempo de llegada, quiere decir que el medio por el que viaja esta señal, en algún punto es diferente al resto del perfil. Si varía la densidad del material, varía la velocidad a la que viaja la señal, y por tanto se retrasa o aumenta el tiempo de llegada.

Lo que sigue siendo difícil, es averiguar exactamente que es lo que ocurre en la profundidad, por ello se debe recurrir a la “historia” de construcción del elemento, y obtener interpretaciones que resulten fiables.

En definitiva, los dos métodos de ensayo aportan información adicional para la comprobación de cimentaciones profundas, y permite corregir errores antes de continuar con la construcción, y que la obra ejecutada se construya según lo previsto, asegurando así su vida útil.

BIBLIOGRAFÍA

García Valcarce, A. y Sacristán Fernández, Jose A. (2003), Manual de Edificación. Mecánica de los terrenos y cimientos. Departamento de Edificación ETS de Arquitectura de la Universidad de Navarra.

Sánchez Domínguez, F. (2008), Recomendaciones para la ejecución e interpretación de ensayos de integridad de pilotes y pantallas “in situ”. Monografías CEDEX.

Fernández Tadeo, C y Amir, J.M. (2009). V Seminario sobre ensayos de pilotes en Madrid.

Código Técnico de la Edificación. Documento Básico de Seguridad Estructural Cimentación. Apartado 5 Cimentaciones Profundas

Instrucción de Hormigón Estructural EHE (2008)

ANEJO Nº1 ENSAYOS MÉTODO SÓNICO

En este anejo se pueden ver ejemplos de reflectogramas obtenidos de ensayos realizados en pilotes por el método sónico en varias obras, explicando la interpretación que se le ha dado en cada caso.

EJEMPLO DE ENSAYO SÓNICO Nº1

En la próxima página, se presentan unos reflectogramas realizados en varios pilotes de la cimentación de una obra en Barcelona.

Estos son un ejemplo de unos reflectogramas en los que no se observa ninguna anomalía, y por tanto se interpreta que los pilotes son continuos y no tienen cambios en su sección transversal. Por tanto podemos decir que son el ejemplo de unos reflectogramas “perfectos”, porque se observa una gráfica con una línea más o menos recta, con una curva inicial hacia abajo que marca el golpe de martillo en la cabeza del pilote, y otra curva final, que indica el rebote de la onda sónica en el final del pilote.

Este es un caso ideal, porque son pilotes realizados cerca de un río, donde el terreno es arenoso y debido a que el rozamiento lateral del pilote con el terreno es muy bajo, la onda viaja exclusivamente a través del fuste del pilote. En otros casos donde hay terrenos arcillosos por ejemplo, se debe amplificar la señal, para poder verla con claridad, porque por el rozamiento del pilote con el terreno, se pierde parte de la onda.

Como se ha explicado en la memoria de este documento, el reflectograma que se muestra en la página siguiente para cada pilote, es la media de al menos 10 reflectogramas. Cuando hacemos el ensayo en obra, cada golpe de martillo nos da una gráfica, y de todas ellas, tenemos que eliminar las que son muy diferentes al resto. Cuando todas las gráficas individuales son iguales o lo más parecidas posible, podemos decir que hemos llegado a obtener una gráfica que nos representa el pilote lo mejor posible.

En los próximos ejemplos, se explicarán los defectos más comunes que se suelen encontrar en la realización de este tipo de ensayos.

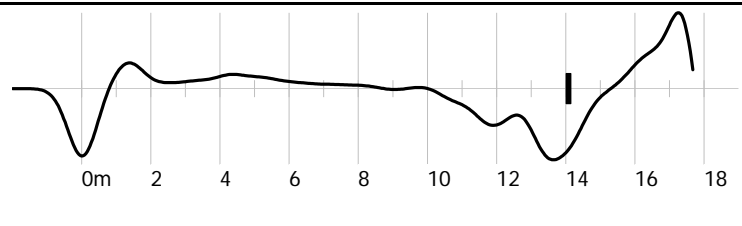
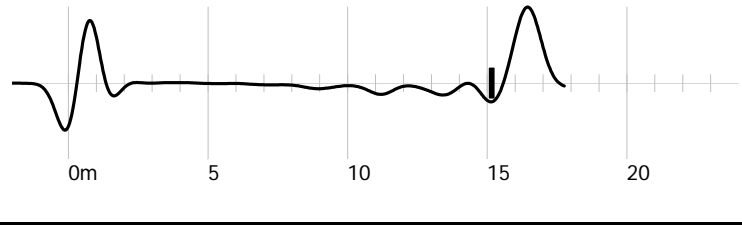
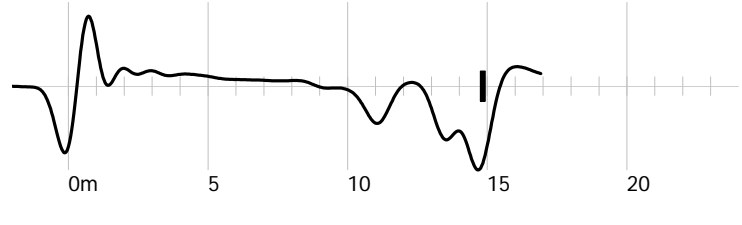
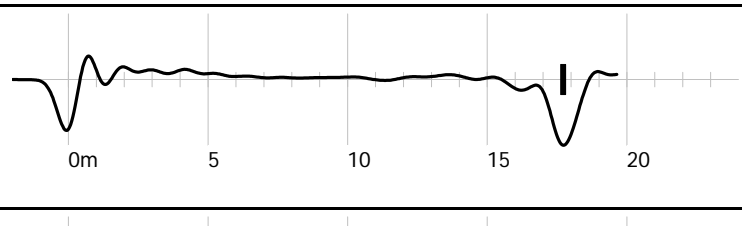
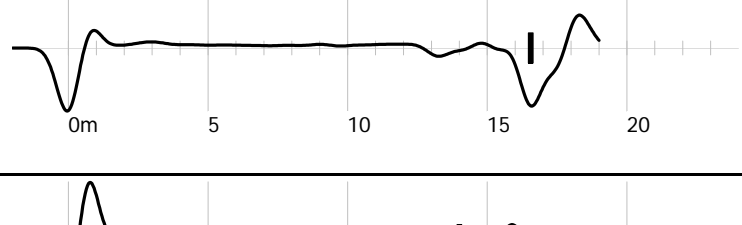
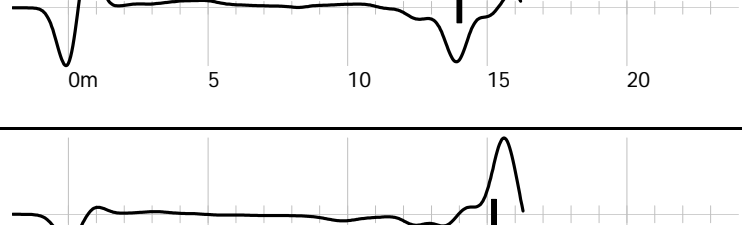
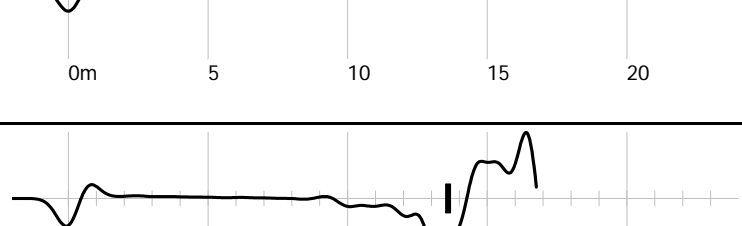
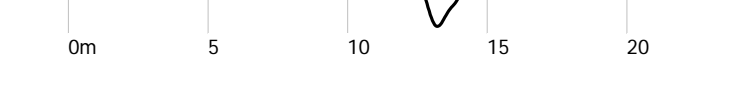
Pilote	Longitud	Reflectograma
29	11,0m	
30	10,8m	
31	11,0m	
32	11,2m	
33	10,5m	
34	10,9m	
35	10,8m	

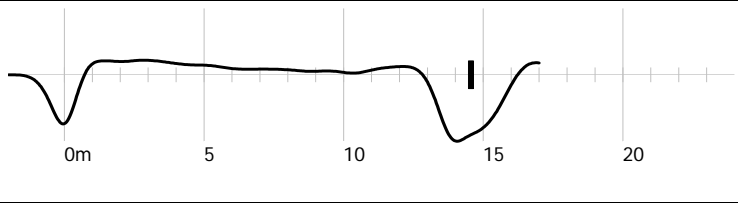
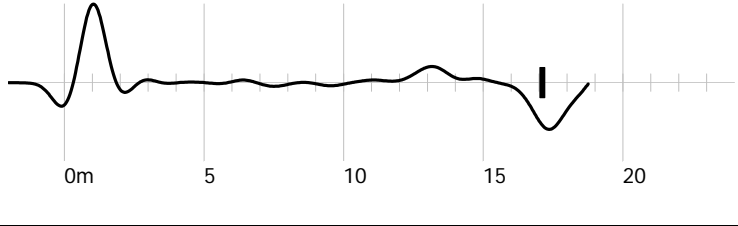
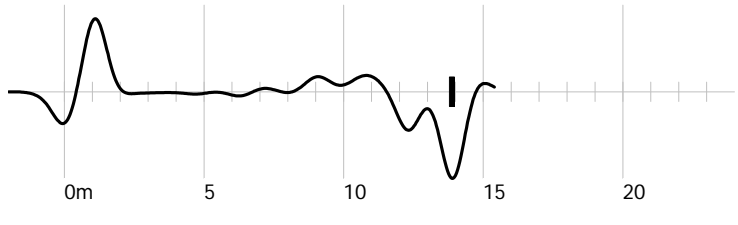
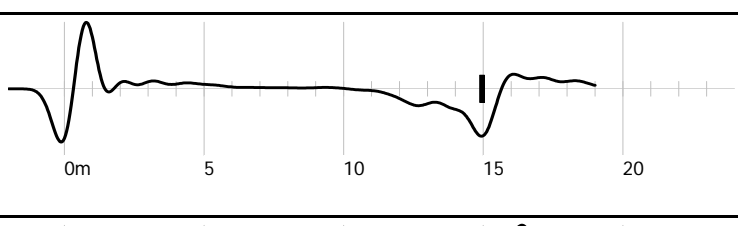
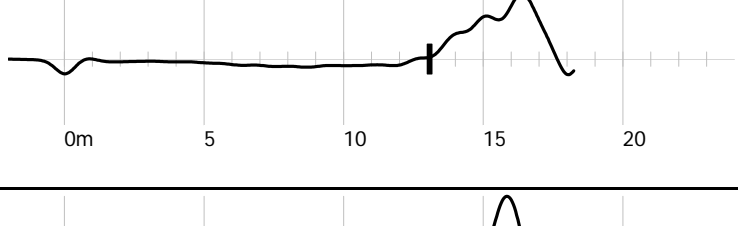
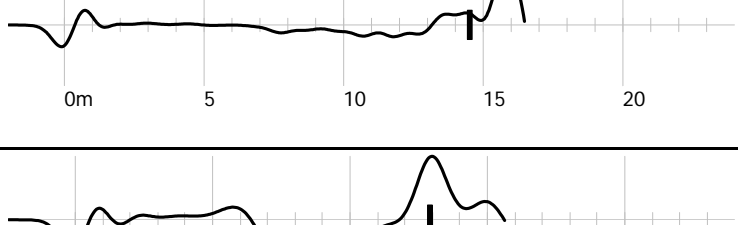
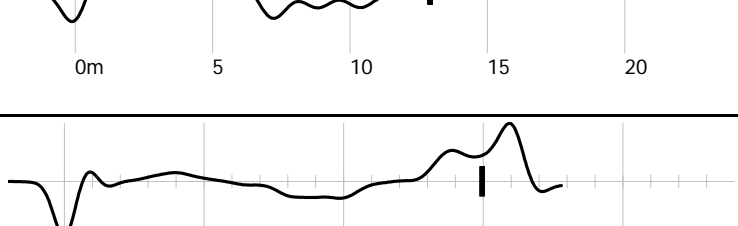
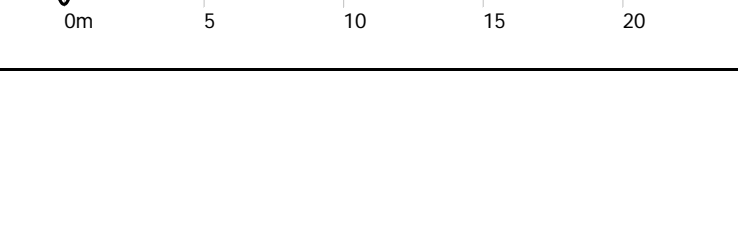
EJEMPLO DE ENSAYO SÓNICO Nº2

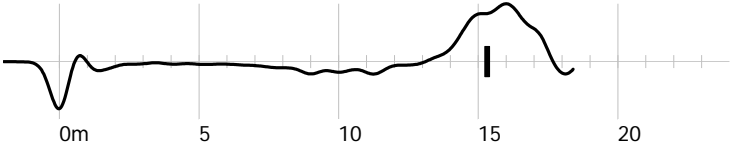
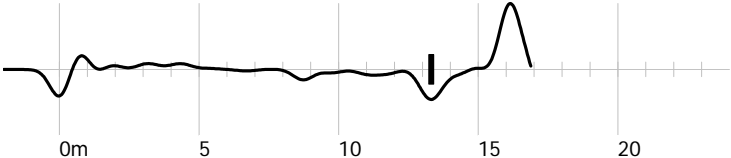

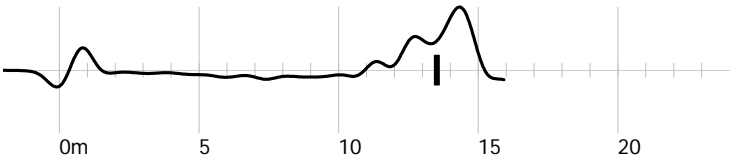
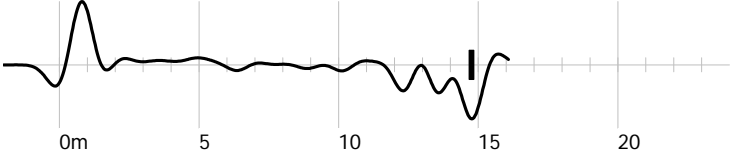
En los siguientes reflectogramas, encontramos los casos más habituales en la realización de los ensayos por el método sónico. Corresponden a los pilotes de la cimentación de una obra civil de carretera, en el estribo de un puente en Girona, que tienen una profundidad estimada de proyecto de 15 metros.

El terreno es arcilloso según el estudio geotécnico, por lo que ofrece un rozamiento alto con el pilote, además en la cota de final de los pilotes existe una capa de gravas. Debido al tipo de terreno, se tiene que amplificar la señal para poder obtener unas gráficas en las que poder obtener una interpretación, y a causa de ello, la señal tiene bastante “ruido”.

- En el caso del reflectograma del pilote Nº3, el final del pilote se puede interpretar que se encuentra a 15 metros aproximadamente, como nos indica la curva final del reflectograma. No obstante, a 11 metros de profundidad, la gráfica tiene una curva hacia abajo, lo que nos indica que podría haber una pequeña disminución de sección en este punto.
- En varios de los reflectogramas, como el del pilote Nº 7, el final del pilote se indica en la gráfica como una curva o pico hacia arriba. Esto normalmente indica que el pilote está empotrado, y tal y como se ha explicado en la memoria del documento, si el pilote está empotrado, se produce un cambio de polaridad de las ondas (inicio con una curva hacia abajo y el final con una curva hacia arriba). Observando el estudio geotécnico, se comprueba que no existe terreno rocoso donde pueda estar empotrado el pilote, pero observamos como hemos dicho anteriormente, que hay una capa de gravas. Se puede interpretar que en algunos pilotes, si el hormigón era fluido como se requiere para el hormigonado de este tipo de elementos, puede que en la zona final del pilote se haya filtrado a través de las gravas parte de hormigón, y lo que nos indica en este final, es que se produce un ensanchamiento de la sección.
- En el pilote Nº19, no podemos ver el final del pilote, ya que en el final tiene oscilaciones muy abruptas, seguramente debido al descabezado del pilote que se observa en obra que tiene varias fisuras que producen rebotes en la onda.

Pilote	Longitud	Reflectograma
1	14.1m	
2	15.2m	
3	14.8m	
4	17.7m	
5	16.6m	
6	14.0m	
7	15.2m	
8	13.6m	

Pilote	Longitud	Reflectograma
9	14.6m	
10	17.1m	
11	13.9m	
12	15.0m	
13	13.1m	
14	14.5m	
15	12.9m	
16	15.0m	

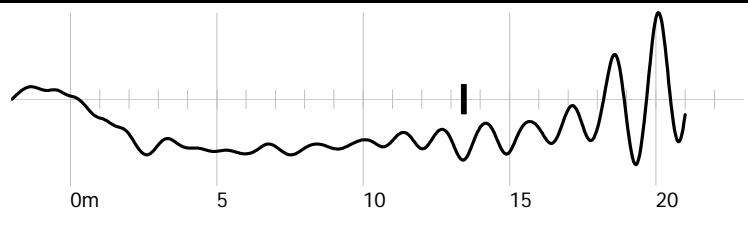
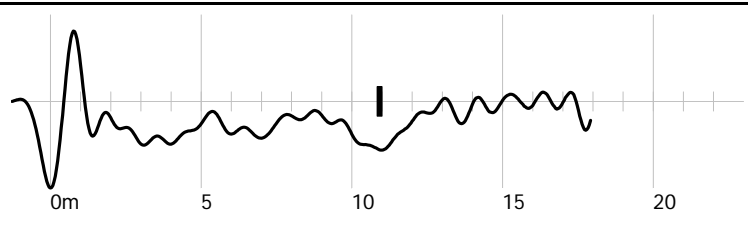
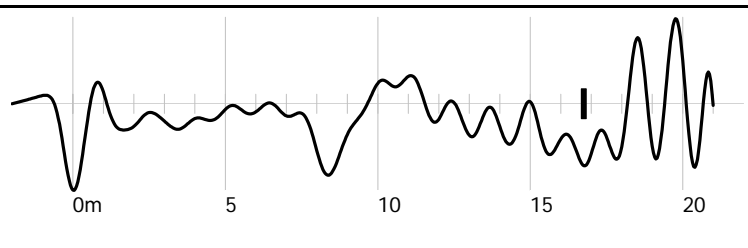
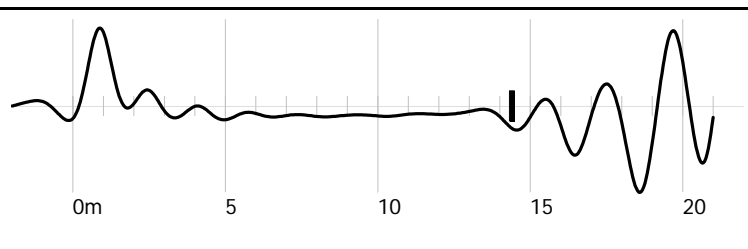
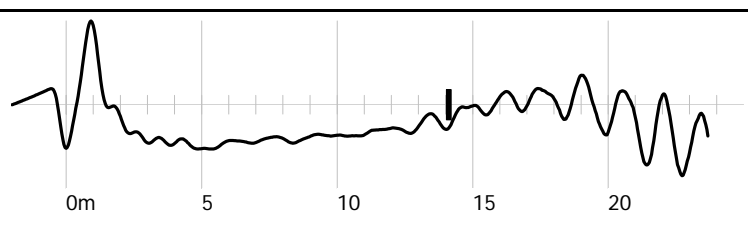
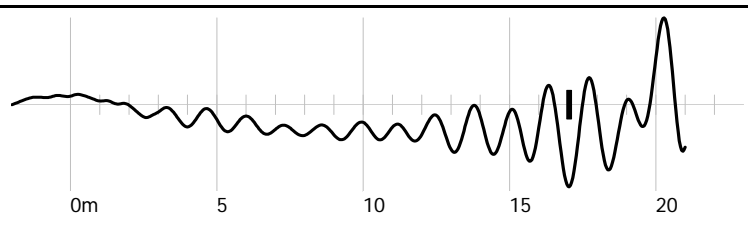
Pilote	Longitud	Reflectograma
17	15.3m	
18	13.3m	
19	21.8m	
20	13.5m	
21	14.8m	

EJEMPLO DE ENSAYO SÓNICO N°3

En el siguiente ejemplo, se muestran unos reflectogramas en los que no se puede detectar la profundidad de los pilotes, a pesar de que en longitud se indique un cierto valor, éste no tiene validez, ya que es la profundidad que el programa marca, pero si se observan las gráficas, no se puede interpretar que sea la longitud correcta.

En este caso, tras ver que en prácticamente ninguno de los pilotes se podía obtener un resultado de ensayo interpretable, se indagó sobre la construcción, y se indicó, que estos pilotes se habían construido a nivel de calle, y actualmente se encontraban unos 3 metros por debajo de esta cota. Se preguntó sobre la forma de descabezar estos pilotes, y se habían tirado abajo con una retroexcavadora. Esta forma de tirar los pilotes, provoca que aparezcan fisuras por el resto del fuste del pilote que impiden que

la señal de ensayo viaje por el pilote y por eso se observan este tipo de reflectogramas.

Pilote	Longitud	Reflectograma
1	13.4m	
2B	10.9m	
3B	16.8m	
4A	14.4m	
5B	14.1m	
11	17.0m	

ANEJO Nº2 ENSAYOS CROSS-HOLE

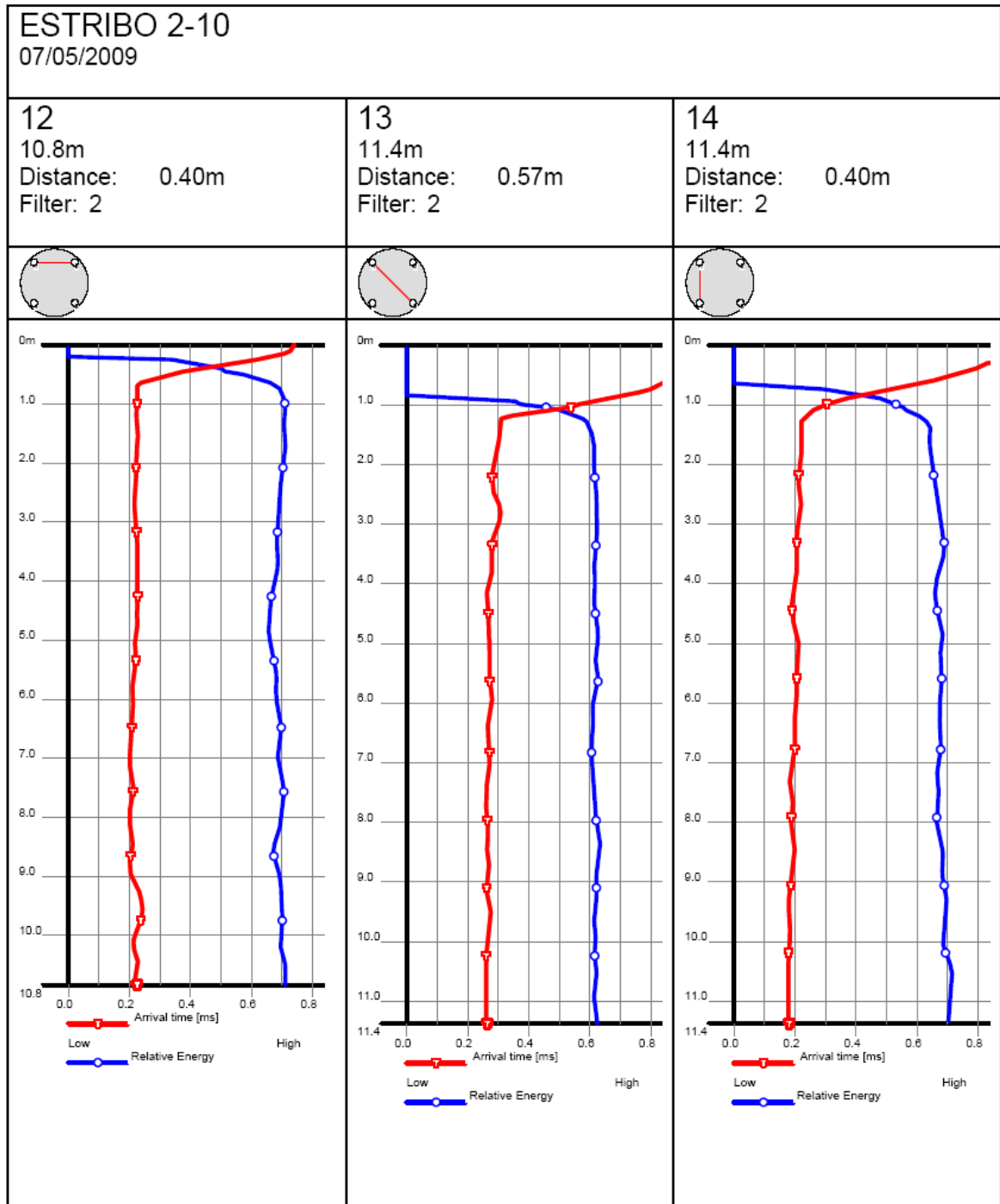
En este anejo se pretende exponer unos ejemplos reales de ensayos realizados mediante el método ultrasónico Cross-Hole o Transparencia Sónica, para explicar el contenido de las diagrfías, los datos que deben aparecer en las mismas para que la persona que vea los resultados, pueda tener la máxima información, y explicar cuál es la interpretación que se da a cada una de las diagrfías, para poder facilitar la familiarización con estos ensayos y que su interpretación pueda ser más fácil para alguien que no tiene conocimientos expertos en estos ensayos.

EJEMPLO DE ENSAYO CROSS-HOLE N°1

Las diagrfías de la siguiente página, es un ejemplo de unas diagrfías de ensayo ultrasónico Cross-Hole en las que no se observa ninguna anomalía. En ellas se deben indicar como mínimo el nombre de referencia del elemento, la fecha, el número de de los tubos que forman el perfil ensayado y un croquis que nos indique por donde pasa el perfil en el pilote. En este caso, el perfil 12, indica que es el perfil ensayado entre el tubo que hemos denominado 1 y el tubo que hemos denominado 2, y en el croquis indica que es un perfil que ensaya el perímetro del pilote, en cambio el perfil 13, entre el tubo 1 y el tubo 3, nos está ensayando el perfil que cruza la zona central del pilote.

La línea roja indica el tiempo que tarda en llegar desde el emisor hasta el receptor, la primera onda ultrasónica a través del hormigón. Después siguen llegando más ondas, pero se tiene en cuenta la primera de todas, la más rápida que suponemos que viaja en línea recta desde el emisor al receptor. La línea azul, indica la energía relativa de la onda ultrasónica. Estas dos líneas están formadas por puntos individuales que surgen de registrar el FAT (First Arrival Time), que es el primer tiempo de llegada de la señal. A medida que vamos izando las sondas hacia arriba, la rueda mide el desplazamiento y ordena al equipo de registro que realice el cálculo cada 5 cm, registrando también la energía de la señal.

El ensayo se comienza desde la parte inferior de los tubos, haciendo un barrido hacia arriba. Las diagrfías tienen una cuadrícula numerada donde se indica en el eje de ordenadas la profundidad, siendo el número de la parte inferior, la máxima profundidad alcanzada por las sondas, y en el eje de abcisas el tiempo en milisegundos que tarda en llegar la primera señal. El valor de la energía es adimensional.



Decimos que estas 3 diagrafías son correctas, porque no hay variación a todo lo largo del perfil ensayado del tiempo, se mantiene más o menos constante, lo que indica que la onda tarda siempre el mismo tiempo en llegar del emisor al receptor a través del medio atravesado, que es el hormigón. Si la primera onda se encontrara alguna anomalía en el camino hacia el receptor, tendría que dar un rodeo a esta anomalía variando el tiempo de llegada, o variaría el tiempo simplemente porque la densidad del material sería diferente. También en el caso de encontrar una anomalía, la energía

relativa podría variar aunque no necesariamente, ya que la energía recibida, es la de todo el conjunto de ondas, y el tiempo de llegada, es solo de la primera de ellas. Por tanto, la línea más importante para la interpretación, es la roja, la del tiempo, y la de la energía nos serviría para corroborar si el defecto es importante o no.

A la profundidad de 1 metro aproximadamente, el tiempo de llegada aumenta considerablemente y la energía desciende totalmente y esto es porque las sondas ya han salido del hormigón y ese primer metro, es la longitud de tubo exenta del elemento. Esto obviamente se ha de comprobar "in situ" midiendo la longitud de tubo que sobresale del hormigón. Por tanto, a la profundidad indicada del perfil de ensayo, se debe restar esta longitud de tubo exenta del pilote.

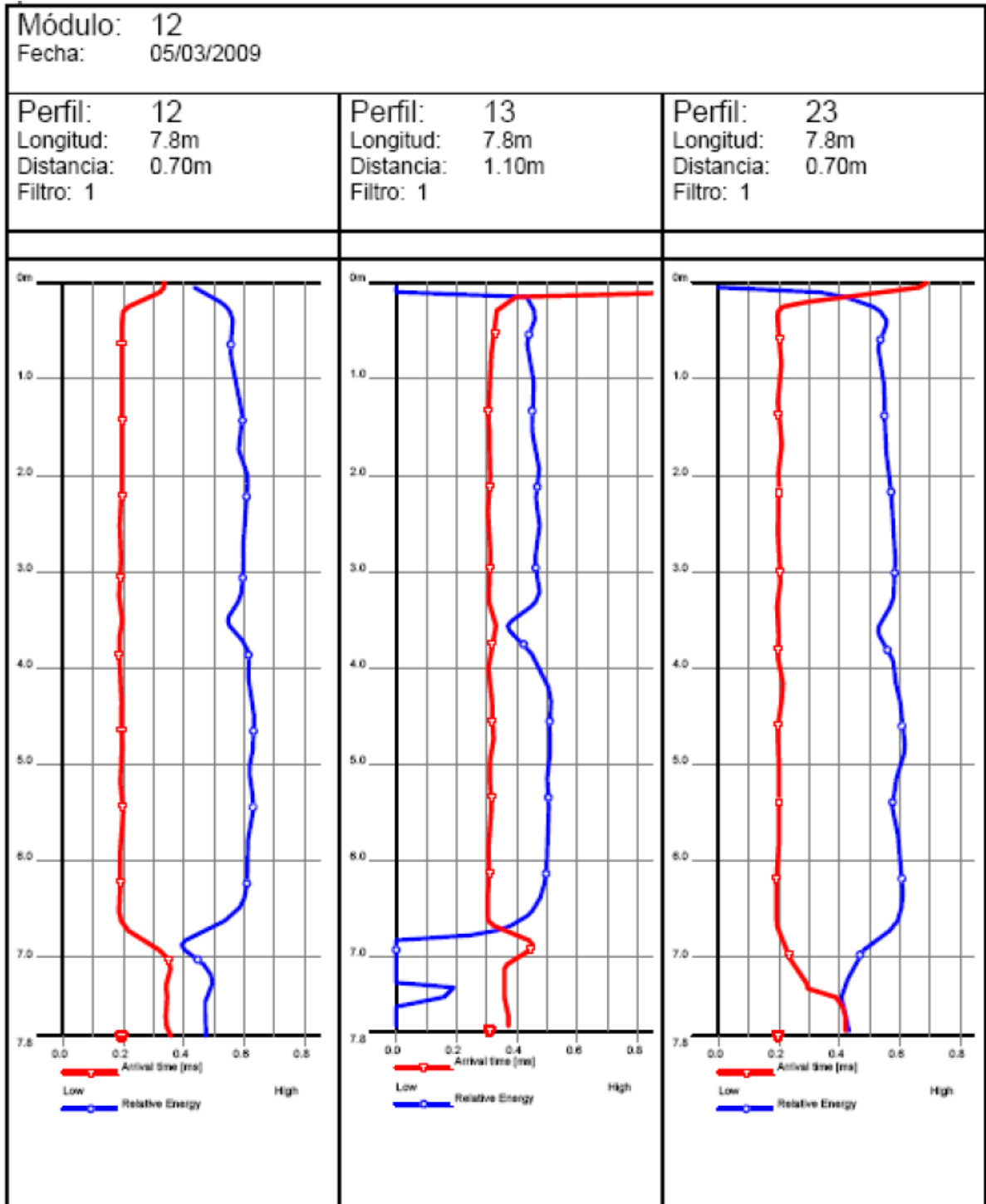
EJEMPLO DE ENSAYO CROSS-HOLE Nº2

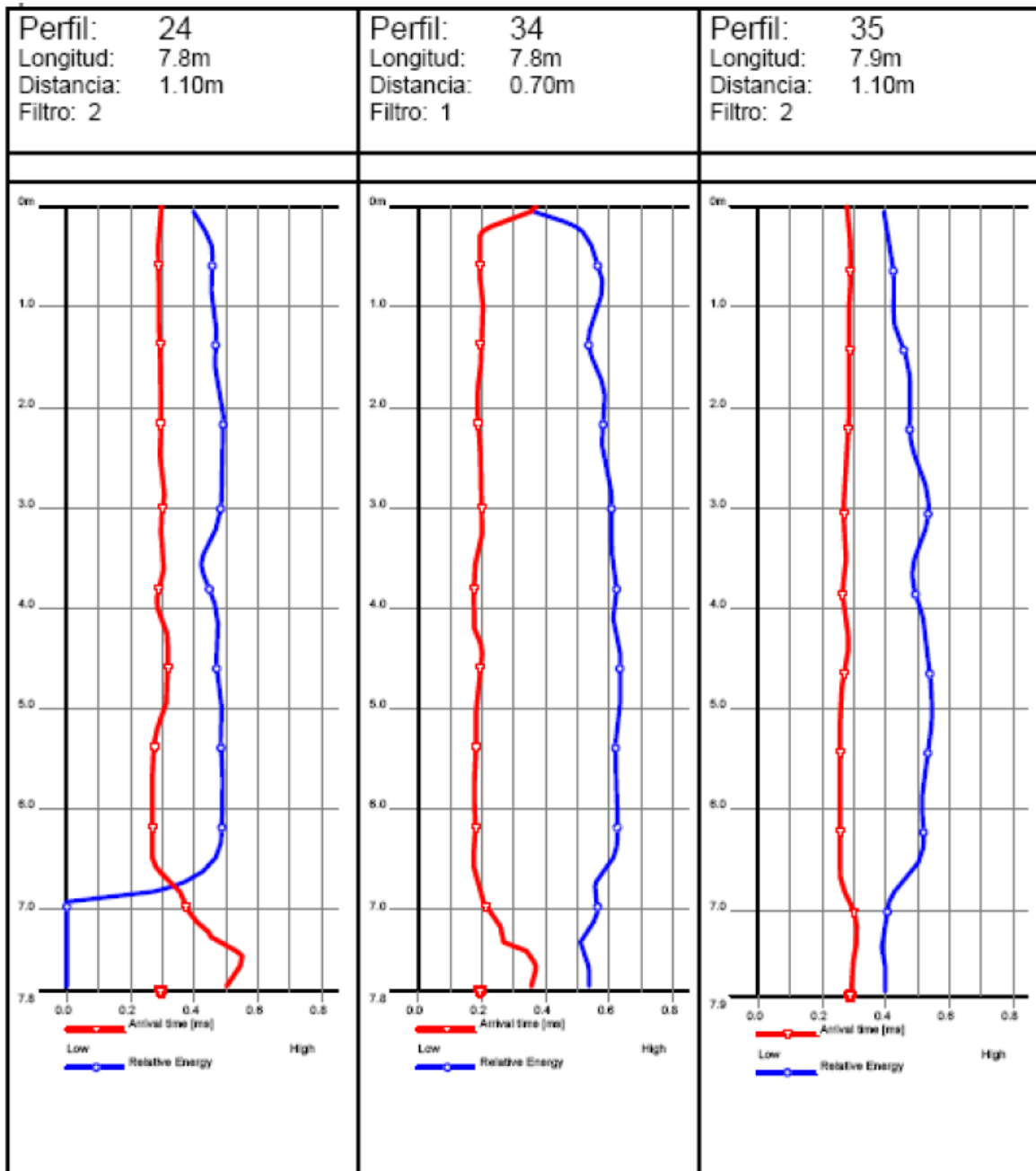
Las diagragfías siguientes, corresponden a 6 perfiles de ensayo que se realizaron en un zapilote de la cimentación de una obra en Barcelona.

Se puede observar que en la parte inferior de los 6 perfiles, existe una anomalía en la diagragfía, ya que el tiempo de llegada de la señal, es superior considerablemente en el último medio metro de zapilote, que en el resto, que se mantiene constante hasta que las sondas salen del elemento. También comprobamos que la energía relativa de la señal, disminuye e incluso llega a ser nula en el perfil 13.

Esto nos indica, que en el último medio metro del zapilote, algo impide que las señales de ultrasonido lleguen a su debido tiempo, y que la energía que llega al receptor, es inferior. Por tanto el medio atravesado, suponemos que debe ser diferente que en el resto del zapilote.

Se pregunta en obra, los posibles defectos de construcción, se comprueba el estudio geotécnico, y se observa la presencia de agua de nivel freático aproximadamente a esta profundidad, y la obra tiene 6 pozos bombeando continuamente para extraer el agua subterránea. Se llega a la hipótesis de que se haya producido un lavado de hormigón en la parte inferior del zapilote, debido a la corriente de agua de nivel freático.





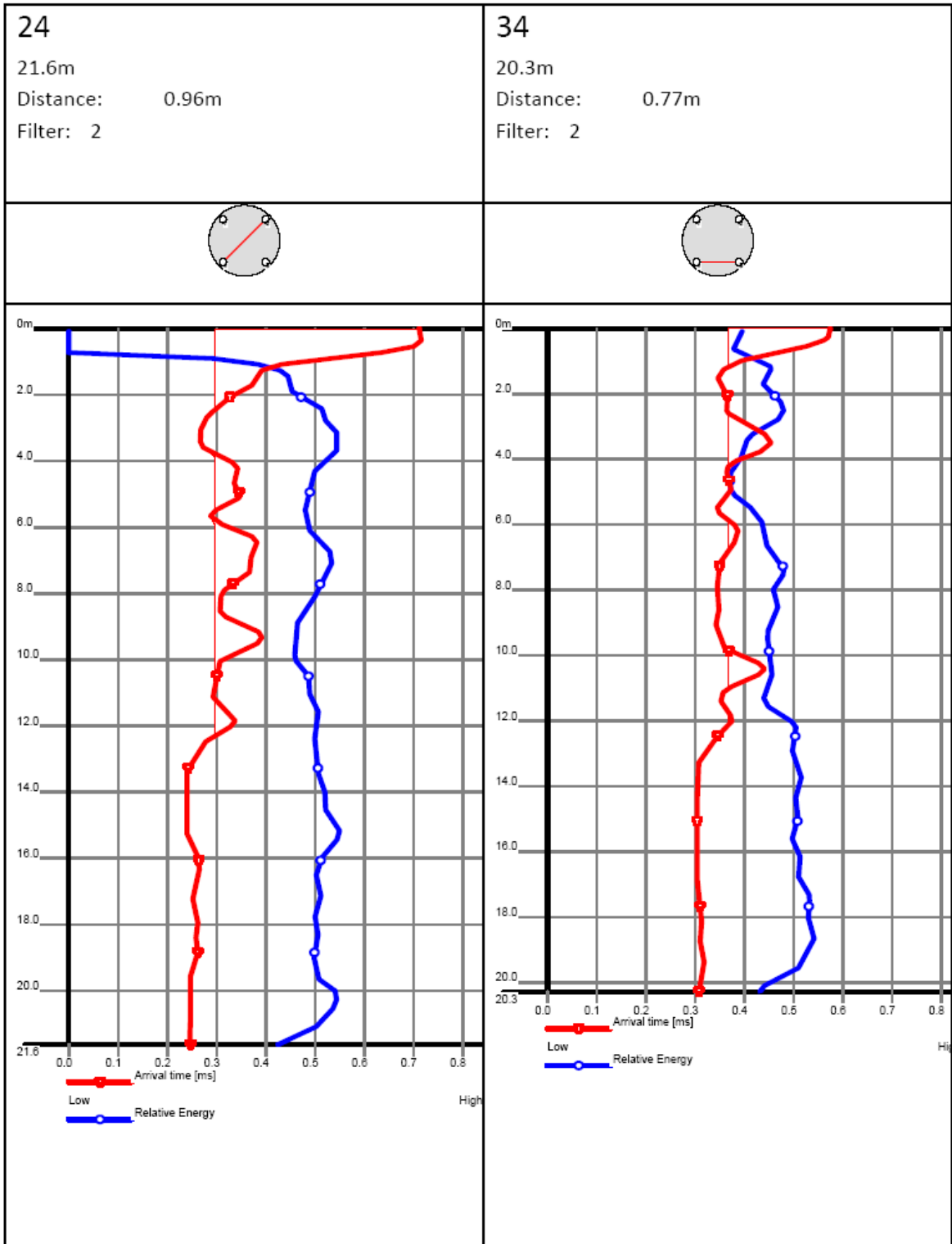
Esta hipótesis se debía confirmar y como se había previsto realizar más ensayos de Cross-Hole en otros zapilotes, se decidió esperar 2 días para poder ensayar otros 3 zapilotes, ya que todavía no habían cumplido los 5 días de edad. Tras realizar el ensayo en estos 3 zapilotes, se observó el mismo defecto en todas las diagragfías, por lo que se dedujo que si 4 zapilotes tenían este error, el resto seguramente también, por lo que se optó por hacer un testigo con sonda rotativa de todo el zapilote en los 4 ensayados. Después de realizar el sondeo, en la extracción del último medio metro, se observó que lo que se extraía no era hormigón. Tal y como se había deducido inicialmente, se había producido un lavado de hormigón.

Se optó por realizar un inyectado de hormigón en todos los zapilotes antes de seguir con la estructura.

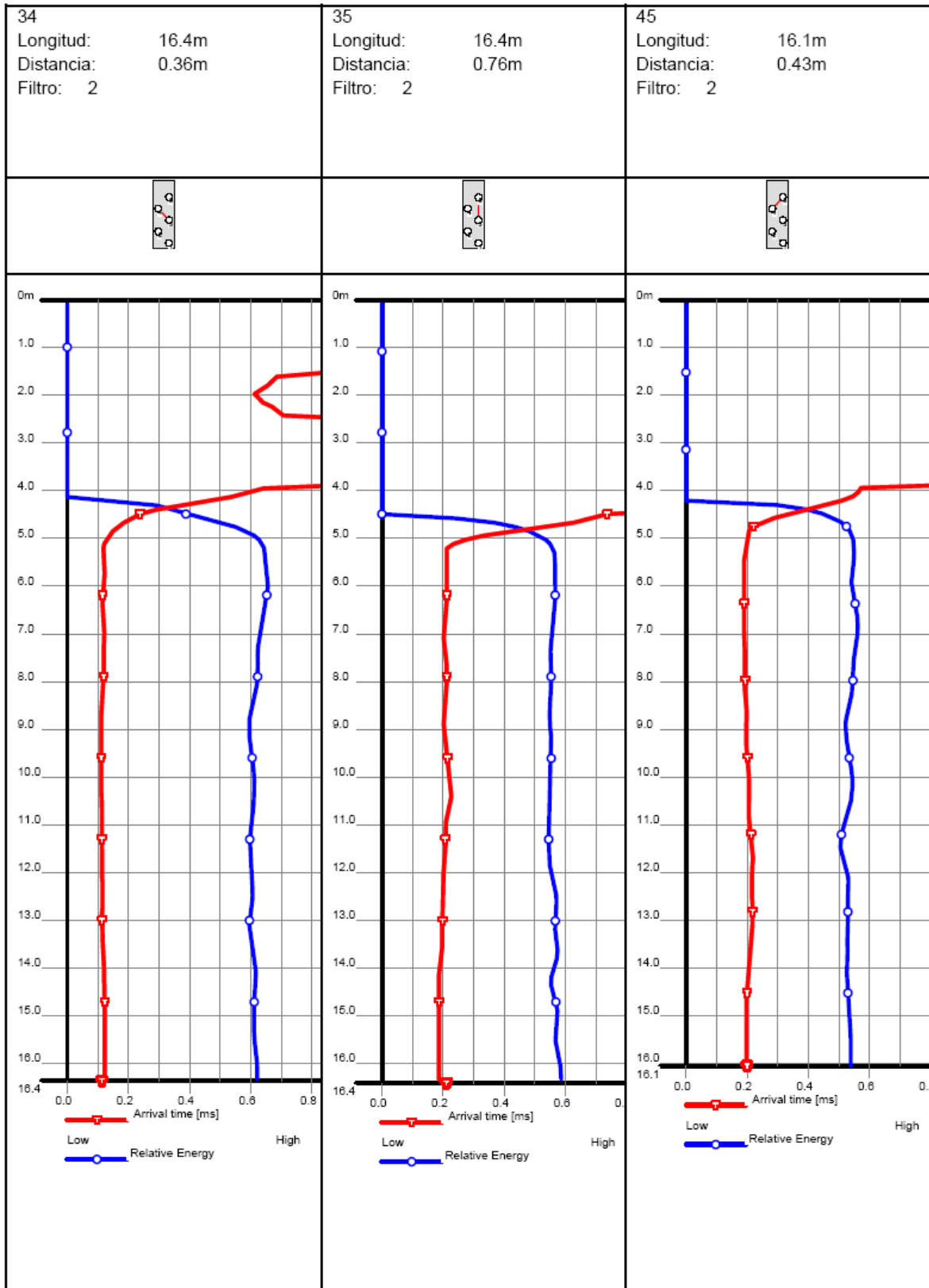
EJEMPLO DE ENSAYO CROSS-HOLE N°3

Las siguientes, son otras diagráffas de los pilotes de una obra en Sant Sadurní d'Anoia en las que se pueden observar bastantes variaciones del tiempo de llegada de la señal y la energía relativa también varía. En este caso se dedujo que era debido a la entrada de lodos y fango en los tubos que hacía que la señal no llegara correctamente.

Después de limpiar los tubos, introduciendo una manguera a presión, se volvió a repetir los ensayos y salieron correctamente. Este ejemplo sirve para explicar porqué los tubos deben permanecer cerrados herméticamente hasta el momento de la realización del ensayo.



EJEMPLO DE ENSAYO CROSS-HOLE N°4



Las 3 diagragfías anteriores, corresponden a uno de los zapilotes de la cimentación de una obra en Barcelona.

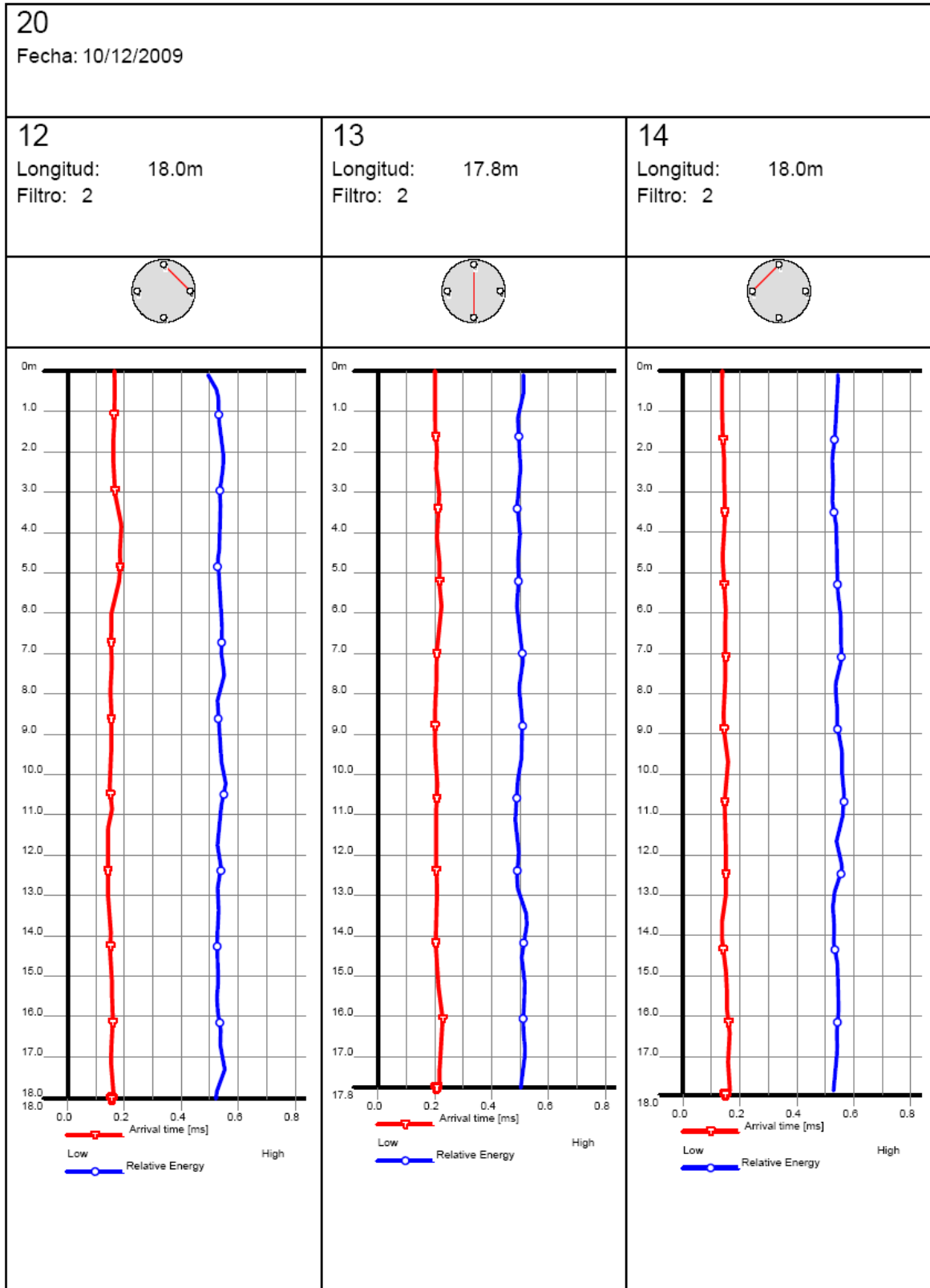
En estas 3 diagrfías, inicialmente se observa una anomalía, y es que los 4 primeros metros no hay señal de energía y por lo tanto tampoco tiempo de llegada. Son zapilotes que se sitúan a 4 metros por debajo de la cota actual de terreno, pero se han dejado previstos los tubos hasta arriba, antes de hacer el rebaje del terreno, por lo que obviamente ya conocemos de antemano que en estos 4 primeros metros, no hay hormigón.

Entonces podemos decir que en estas 3 diagrfías no se observa ninguna anomalía que se pueda interpretar como un defecto o fallo en el zapilote.

EJEMPLO DE ENSAYO CROSS-HOLE N°5

En el ejemplo de la siguiente página, se observan unas diagrfías, en las que las dos líneas, tanto la del tiempo de llegada como la de la energía relativa, son constantes en toda la longitud ensayada.

Esto es porque los tubos para realizar el ensayo, no sobresalen del hormigón, por lo que las sondas no sobresalen del hormigón.



EJEMPLO DE ENSAYO CROSS-HOLE N°6

A continuación se detallan las anomalías encontradas en las diagragfías de un muro pantalla, en una obra de Barcelona, en la que había bastantes problemas con los tubos, que muchos de ellos estaban doblados porque había pasado maquinaria por encima, también estaba toda la zona llena de lodo con la posible obstrucción de algunos de los tubos.

También se hizo el ensayo entre dos pantallas continuas hormigonadas diferente día, para comprobar el resultado de ensayo. Obviamente, al no estar hormigonado el mismo día, el ensayo tiene una interrupción en el paso de la señal.

PANTALLA	OBSERVACIONES
Pantalla 33	<ul style="list-style-type: none"> - Perfil 1-2 y 2-3: La profundidad máxima alcanzada por los sensores es 20m aproximadamente. Según el estado del terreno a nivel de la zona superior de la pantalla y de los tubos, pudiera ser que los tubos están obstruidos con bentonita a partir de esa profundidad. - Perfil 3-4: No se observan anomalías. - Perfil 4-5 (tubo 4 pantalla 33 y tubo 1 pantalla 34): Se trata de una junta entre las pantallas 33 y 34, y la energía de la señal no es continua. <p style="text-align: center;">Nota: Longitud exenta de tubos 6cm</p>
Pantalla 34	<ul style="list-style-type: none"> - Perfil 1-2: No se observan anomalías hasta la profundidad alcanzada. - Perfil 2-3 y 3-4: En el perfil 2-3, la señal se retrasa desde los 8m hasta la parte superior de la pantalla. En el perfil 3-4, la señal se corta a partir de los 6m hasta la parte superior. <p style="text-align: center;">Nota: Longitud exenta de tubos 8cm</p>
Pantalla 35	<ul style="list-style-type: none"> - Perfil 1-2 y 3-4: No se observan anomalías hasta la profundidad alcanzada. - Perfil 2-3: La señal se retrasa en varios puntos concretos del perfil, lo que puede indicar fisuras o coqueas en estos puntos.

	<p>- Perfil 4-5 (tubo 4 pantalla 34 y tubo 1 pantalla 35): Se trata de una junta entre las pantallas 34 y 35, y la energía de la señal no es continua.</p> <p>Nota: Longitud exenta de tubos 70cm</p>
Pantalla 37	<p>- Perfil 1-2: No se observan anomalías</p> <p>- Perfil 2-3: La profundidad máxima alcanzada por los sensores es 22,3m. Según el estado del terreno a nivel de la zona superior de la pantalla y de los tubos, pudiera ser que los tubos están obstruidos con bentonita a partir de esa profundidad, y posiblemente debido a ello a partir de los 18 m, se debilita la señal.</p> <p>- Perfil 3-4: No se observan anomalías</p> <p>- Perfil 4-5 (tubo 4 pantalla 37 y tubo 1 pantalla 38): a partir de los 16 metros se retrasa la llegada de la señal, y a partir de los 24, se pierde por el mismo motivo.</p> <p>Nota: Longitud exenta de tubos 20cm</p>
Pantalla 38	<p>- Perfiles 1-2, 2-3 y 4-5 (tubo 4 pantalla 38 y tubo 1 pantalla 39): La energía de la señal es baja, pero el tiempo de llegada es continuo en la longitud de los tubos. Podría deberse, como en los casos anteriores, a que el agua que contienen los tubos esté sucia y contenga bentonita</p> <p>- Perfil 3-4: No se observan anomalías.</p> <p>Nota: Longitud exenta de tubos 20cm</p>
Pantalla 39	<p>- Perfil 1-2, 2-3 y 3-4: La profundidad máxima alcanzada por los sensores es de 17m aproximadamente desde el borde superior del tubo. Según el estado del terreno a nivel de la zona superior de la pantalla y de los tubos, pudiera ser que los tubos están obstruidos con bentonita a partir de esa profundidad.</p> <p>Nota: Longitud exenta de tubos 26cm</p>

Pantalla 41	<p>- Perfil 1-2 y 2-3: La profundidad máxima alcanzada por los sensores es de 21m aproximadamente desde el borde superior del tubo. Según el estado del terreno a nivel de la zona superior de la pantalla y de los tubos, pudiera ser que los tubos están obstruidos con bentonita a partir de esa profundidad. En el perfil 1-2 no se observan anomalías hasta esa profundidad. En el perfil 2-3, el tiempo de llegada de la señal, es excesivamente alto, podría deberse, como en los casos anteriores, a que el agua que contienen los tubos esté sucia y contenga bentonita.</p> <p>- Perfil 3-4: No se observan anomalías.</p> <p>Nota: Longitud exenta de tubos 18cm</p>
Pantalla 40	<p>- Perfil 1-2 y 2-3: La profundidad máxima alcanzada por los sensores está entre los 23 y 19 m aproximadamente desde el borde superior del tubo. Según el estado del terreno a nivel de la zona superior de la pantalla y de los tubos, pudiera ser que los tubos están obstruidos con bentonita a partir de esa profundidad. En el perfil 1-2 no se observan anomalías hasta la profundidad de 23,6m. En el perfil 2-3, el tiempo de llegada de la señal, es constante, pero la energía de la señal disminuye a partir de los 18m, posiblemente debido a la suciedad en el interior del tubo.</p> <p>- Perfil 3-4: No se observan anomalías, pero en los primeros 10 metros, la señal se retrasa, puede ser producido por hormigón con porosidad en dicha zona.</p> <p>Nota: Longitud exenta de tubos 24cm</p>
Pantalla 42	<p>- Perfil 1-2 y 2-3: La profundidad máxima alcanzada por los sensores es de 18m aproximadamente desde el borde superior del tubo. Pudiera ser que los tubos están obstruidos con bentonita a partir de esa profundidad. En el perfil 1-2 no se observan anomalías hasta esa profundidad. En el perfil 2-3, el tiempo de llegada de la señal, se retrasa a partir de los 11m.</p> <p>- Perfil 3-4: No se observan anomalías.</p> <p>Nota: Longitud exenta de tubos 19cm</p>

Pantalla 43	<ul style="list-style-type: none">- Perfil 1-2 : No se observan anomalías.- Perfil 4-5 : No se observan anomalías. <p style="text-align: center;">Nota: Longitud exenta de tubos 20cm</p>
--------------------	---

