

# Recomendaciones para la ejecución e interpretación de ensayos no destructivos para el control de la integridad de pilotes y pantallas "in situ"





# ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS PARA EL CONTROL DE LA INTEGRIDAD DE PILOTES Y PANTALLAS “IN SITU”</b> .....	<b>1</b>
1.1.	PRESENTACIÓN. DESARROLLO HISTÓRICO .....	1
1.2.	OBJETO DEL DOCUMENTO .....	2
1.3.	INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS DE AUSCULTACIÓN DE PILOTES .....	3
1.4.	DATOS SOBRE LA CIMENTACIÓN PREVIOS AL ENSAYO .....	5
1.5.	QUÉ MÉTODO UTILIZAR Y EN QUÉ PILOTES .....	6
1.6.	NÚMERO DE PILOTES O MÓDULOS DE PANTALLA A ENSAYAR .....	9
1.7.	PROBLEMAS DE CONSTRUCCIÓN DE LOS PILOTES .....	13
1.7.1.	<i>Roturas en cabeza de los pilotes</i> .....	14
1.7.2.	<i>Cortes de hormigón</i> .....	14
1.7.3.	<i>Estricciones, estrechamientos o cuellos de botella</i> .....	15
1.7.4.	<i>Desprendimientos de material en el fondo de excavación o en niveles intermedios</i> .....	16
1.7.5.	<i>Lavado de finos del hormigón</i> .....	18
1.7.6.	<i>Los defectos en punta del pilote</i> .....	18
1.7.7.	<i>Clasificación de defectos-causas</i> .....	19
1.8.	DEFINICIÓN DE ANOMALÍAS, FALLOS Y DEFECTOS.....	24
1.9.	ANÁLISIS DE DEFECTOS .....	27
1.10.	INSPECCIONES COMPLEMENTARIAS-REPARACIONES .....	28
<b>2.</b>	<b>TRANSPARENCIA SÓNICA EN PILOTES Y PANTALLAS</b> .....	<b>31</b>
2.1.	PRINCIPIOS DEL MÉTODO .....	31
2.2.	MÉTODO DE ENSAYO. DENOMINACIÓN.....	33
2.3.	EQUIPOS DE TOMA DE DATOS .....	33
2.4.	REALIZACIÓN DEL ENSAYO.....	37
2.5.	INSTRUMENTACIÓN DEL PILOTE O PANTALLA .....	38
2.5.1.	<i>Tipo de tubos de instrumentación. Número de tubos</i> .....	39
2.6.	CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DE ENSAYO .....	51



CEDEX

2.7.	TOMA DE DATOS Y ANÁLISIS. DIAGRAFÍAS .....	52
2.8.	DISPOSICIONES ESPECIALES DE LAS SONDAS .....	64
2.8.1.	<i>Generalidades</i> .....	64
2.8.2.	<i>Diagrafías en un solo tubo</i> .....	66
2.8.3.	<i>Diagrafías de detalle en punta</i> .....	68
2.9.	INTERPRETACIÓN DE DIAGRAFÍAS. ANÁLISIS DE INTEGRIDAD .....	70
2.10.	VENTAJAS Y LIMITACIONES .....	76
2.11.	INFORME DE RESULTADOS .....	78
<b>3.</b>	<b>TÉCNICAS DE ECO E IMPEDANCIA MECÁNICA EN PILOTES .....</b>	<b>80</b>
3.1.	INTRODUCCIÓN .....	80
3.2.	TÉCNICA DEL ECO PARA EL CONTROL DE INTEGRIDAD DE LOS PILOTES .....	82
3.2.1.	<i>Principios del método del eco</i> .....	82
3.2.2.	<i>Cálculo de la profundidad del pilote en la curva de eco</i> .....	85
3.2.3.	<i>Análisis de la curva de eco</i> .....	87
3.2.4.	<i>Equipo de medida</i> .....	93
3.2.5.	<i>Tratamiento de señal previo (eco)</i> .....	94
3.3.	TÉCNICA DE LA IMPEDANCIA MECÁNICA PARA EL CONTROL DE INTEGRIDAD. ....	96
3.3.1.	<i>Introducción</i> .....	96
3.3.2.	<i>Principios del método</i> .....	97
3.3.3.	<i>Cálculo de la longitud del pilote</i> .....	100
3.3.4.	<i>Análisis de la impedancia mecánica (movilidad, rigidez, admitancia)</i> .....	102
3.3.5.	<i>Equipos de ensayo</i> .....	107
3.3.6.	<i>Impedancia mecánica análisis en frecuencia. Curva de movilidad</i> .....	108
3.4.	INSTRUMENTACIÓN .....	109
3.4.1.	<i>Muestreo</i> .....	110
3.5.	VERIFICACIÓN DE EQUIPOS .....	114
3.6.	PREPARACIÓN DEL PILOTE. REALIZACIÓN DEL ENSAYO.....	116
3.7.	INFLUENCIA DEL TERRENO DE CIMENTACIÓN EN LOS ENSAYOS DE ECO E IMPEDANCIA MECÁNICA. ATENUACIÓN DE SEÑAL. AMORTIGUACIÓN. ESBELTEZ. CAMBIOS DE IMPEDANCIA MECÁNICA .....	119
3.7.1.	<i>Atenuación</i> .....	120
3.7.2.	<i>Cambios de impedancia</i> .....	122
3.7.3.	<i>Reacción e interacción pilote-suelo de cimentación</i> .....	126
3.7.4.	<i>Defectos próximos a la cabeza</i> .....	128
3.7.5.	<i>Detección de la punta</i> .....	129
3.7.6.	<i>Caracterización de la calidad del hormigón</i> .....	129
3.8.	CLASIFICACIÓN BASE DE LAS CURVAS DE ECO E IMPEDANCIA MECÁNICA .....	129
3.8.1.	<i>Señal tipo 0. No hay reflectores</i> .....	130
3.8.2.	<i>Señal tipo 1. Sólo una respuesta y buena</i> .....	131
3.8.3.	<i>Señal tipo 2. Varias respuestas y una más significativa</i> .....	132
3.9.	ANÁLISIS COMBINADO Y ASISTIDO DE SEÑALES DE ECO E IMPEDANCIA MECÁNICA .....	133



CEDEX

3.10.	VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LAS TÉCNICAS DE ECO E IMPEDANCIA MECÁNICA.....	135
3.11.	CASOS ESPECIALES. PILOTES CON EL ENCEPADO EJECUTADO .....	137
	3.11.1. <i>Sísmica paralela</i> .....	138
	3.11.2. <i>Ensayos de ultrasismicidad</i> .....	140
3.12.	INFORME DE RESULTADOS .....	142

Bibliografía

ANEJOS

ANEJO 1	PARTES DE EJECUCIÓN DE PILOTES
---------	--------------------------------



CEDEX

# **1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS PARA EL CONTROL DE LA INTEGRIDAD DE PILOTES Y PANTALLAS “IN SITU”**

## **1.1. Presentación. desarrollo histórico**

Con el presente documento se pretende mostrar todos los aspectos de los métodos de control más desarrollados y actualmente con mayor implantación, para la investigación de la integridad de pilotes "in situ".

Se describen las técnicas de **Transparencia Sónica** mediante ultrasonidos en tubos embebidos en el hormigón y las de registro de la respuesta a un impacto de pequeña amplitud, con martillo de mano como el **Eco** y la **Impedancia Mecánica**, que son las más desarrolladas en nuestro país.

Los métodos aquí descritos se desarrollaron en los años 60, iniciándose rápidamente su aplicación a nivel europeo. En España la gran implantación, salvo algunos ensayos experimentales, se produce en los años 80 y viene asociada a la miniaturización de los equipos electrónicos e informáticos, lo que les hizo de fácil utilización en obra.

Las técnicas para el control de cimentaciones de Transparencia Sónica, Eco e Impedancia Mecánica que se tratan en el texto están cada vez más extendidas en España desde su introducción. Sin embargo, se percibe la necesidad de que se estandaricen los métodos de ensayo, la intensidad del control, la interpretación de los registros y la presentación de resultados en un documento de conclusiones.

El documento pretende servir de guía de referencia de estos ensayos y mostrar ejemplos que colaboren a la correcta interpretación de los resultados y a la solución de diferencias cuando se analiza y valora la afección de los defectos detectados a la cimentación.

Aunque se realiza un breve repaso y se hacen algunas referencias a otras técnicas, el documento intenta ceñirse a éstas. Se ha pretendido que sea lo más práctico posible; sin embargo,



**CEDEX**

en los capítulos que se ha considerado necesario se ha incluido una primera parte teórica breve. Posteriormente se presentan todos los aspectos más importantes de la ejecución del ensayo, análisis de señal, clasificación, defectos detectables y posibles actuaciones.

El número de equipos y de empresas que realizan ensayos no destructivos de pilotes y pantallas en España se ha incrementado en estos últimos años y estos métodos son cada vez más aplicados tanto en edificación como en obra civil, siendo necesario realizar un esfuerzo de estandarización. Las técnicas se han implantado fuertemente en los últimos años en todas las obras de cierta entidad, apareciendo en la mayoría de los proyectos de cimentaciones profundas. Sin embargo, el conocimiento y divulgación de éstas, dando a conocer las ventajas e inconvenientes a las direcciones de obra, contratistas y asistencias técnicas, en cierta medida son escasos.

## **1.2. Objeto del documento**

Actualmente los métodos de control de las cimentaciones profundas o pantallas "in situ", que se deben utilizar y el número de elementos a ensayar vienen indicados comúnmente en los pliegos de los proyectos. En el documento se presentan algunas referencias para facilitar la definición de estos criterios.

Hay que reconocer que las diferencias en los criterios de interpretación de estos ensayos para la validación de pilotes son en ocasiones importantes. Hasta la fecha no existe en España ningún documento normativo que regule la ejecución e interpretación de estos ensayos, a pesar de que los ensayos de integridad realizados, en muchas ocasiones son una ayuda determinante a la toma de decisión para aceptar o rechazar finalmente estas unidades de obra.

Es evidente que la confianza en los resultados proporcionados por los métodos de control sólo puede obtenerse si se conocen adecuadamente los principios en que se basan éstos y las limitaciones que presentan.



CEDEX

Por supuesto estos ensayos deben de servir como una referencia para aceptar o por el contrario rechazar cimentaciones de pilotes, pero para ello habrá que eliminar al máximo las interpretaciones subjetivas de los resultados obtenidos. Se deben referenciar, desde las condiciones mínimas de ensayo, hasta cómo se deben representar los resultados y con qué unidades, e incluso hasta cómo se valora la presencia o no de una anomalía.

En los métodos no destructivos como concepto "defecto" se debe entender de forma general una o varias irregularidades observadas en los registros obtenidos, que indica la presencia de una posible heterogeneidad que afecta a la integridad del elemento. Con esta amplia definición de defecto, es trabajo de este documento definir hasta qué punto se compromete la integridad del elemento una vez observada una irregularidad y su posible origen.

Se pretende mostrar como la aparición de una o varias irregularidades (anomalías) en un ensayo por ejemplo el de la Transparencia Sónica puede no implicar la existencia de un defecto del pilote o pantalla. Es objeto de este documento definir hasta que punto esas irregularidades afectan a la integridad del elemento y su posible origen, y definir los procedimientos de ejecución de estos ensayos que minimicen la aparición de anomalías no asociadas a defectos reales en el pilote.

### **1.3. Introducción a los métodos no destructivos de auscultación de pilotes**

Los métodos no destructivos más usuales de control de la integridad y homogeneidad del hormigonado de cimentaciones profundas, dejando aparte los ensayos de prueba de carga, son los tres siguientes:

- Transparencia Sónica
- Ensayos de Eco
- Ensayos de Impedancia Mecánica



**CEDEX**

Estos tres métodos son los de mayor implantación tanto a nivel mundial como en nuestro país. Otros ensayos también no destructivos pero con muchísimas menos referencias sobre su utilización son:

- Sísmica Paralela
- Ensayos de vibración horizontal en cabeza
- Métodos eléctricos
- Nucleares
- Radares

Los ensayos de vibración horizontal se usan sólo para situaciones especiales de carga de pilotes. En cuanto a los métodos eléctricos y nucleares nunca han tenido mucho desarrollo. En el caso del primero por los resultados poco fiables y en el segundo por la dificultad de manejar sondas nucleares en sondeos o tubos preinstalados. De los radares se comienzan a ver ensayos experimentales interesantes al disponerse ya de antenas que pueden entrar en tubos de auscultación.

Los tres primeros además han sufrido un fuerte desarrollo sobre todo en los aspectos de miniaturización, aumentando el potencial de los equipos de toma y tratamiento de datos, siendo actualmente una gran herramienta de control de defectos en pilotes y pantallas perforadas.

En estos últimos años la utilización asidua de estos métodos de control ha permitido conocer con detalle la problemática de las cimentaciones y las incidencias que se pueden producir, debido al empleo de un determinado tipo de pilotes en distintas condiciones geotécnicas.

Es preocupación de este documento promover, sobre todo, un buen conocimiento de las técnicas de control no destructivo de cimentaciones profundas, mostrando que ventajas y limitaciones tienen y cuáles son los defectos más comunes que se observan, para asegurar la buena calidad de las cimentaciones a un bajo coste.



Las técnicas no destructivas tienen que ser una herramienta que ayude a reducir las incertidumbres que entrañan las cimentaciones profundas, lo que permitiría mejorar los procedimientos de ejecución y reducir los coeficientes de seguridad empleados en su diseño.

#### **1.4. Datos sobre la cimentación previos al ensayo**

Antes de realizar ensayos de Transparencia Sónica, Eco o Impedancia Mecánica, es **imprescindible** disponer por parte de la empresa de control de unos determinados datos que le permitan realizar una interpretación correcta de los ensayos.

Los datos previos básicos de los que se debe de disponer antes de realizar cualquier intervención son:

- Identificación del elemento
- Las dimensiones y tipo de los pilotes a ensayar
- Situación en planta del elemento a auscultar en la obra
- Cotas de la cabeza y el fondo de perforación.

Si se utilizan tubos para realizar ensayos de Transparencia Sónica, hay que conocer la situación de los tubos en planta, las cotas de los extremos superiores de los tubos y sus longitudes. Además es importante conocer con la mayor precisión las condiciones geotécnicas del entorno, especialmente si el análisis se realiza mediante ensayos de Eco o de Impedancia Mecánica, ya que se pueden producir reflexiones de la señal en capas geotécnicas diferenciadas, pudiendo confundirse con cortes o anomalías a la cota de dichas capas.

El conocimiento de la dosificación y características del hormigón y de las incidencias que se han producido tanto durante la excavación del pilote como en el suministro de hormigón y durante el proceso de hormigonado, es esencial para discernir, en el caso de que se hayan producido anomalías, cuáles pueden haber sido los motivos y así tener indicaciones para poder realizar las reparaciones que sean necesarias.



**CEDEX**

En especial, siempre que se detecte la presencia de un defecto, conviene consultar los partes de ejecución, ya que en la gran mayoría de los casos el cruce de información proporciona la respuesta a las causas de las anomalías.

En el Anejo 1 se propone un parte de perforación y hormigonado con los datos mínimos que se deberían incluir cuando se ejecutan pilotes o pantallas sobre los que posteriormente se realizarán ensayos no destructivos. Este parte ha sido elaborado a partir de los modelos de parte incluidos en la norma EN 1536: 1999 “Ejecución de trabajos especiales de geotecnia. Pilotes perforados”.

### **1.5. Qué método utilizar y en qué pilotes**

Si se piensa en un método no destructivo de control de pilotes que fuera perfecto, este tendría que proporcionar información de todos los defectos que se pueden producir tanto en el interior del hormigón como en la periferia (contacto pilote-suelo) y definir su localización exacta en profundidad y en extensión y su situación respecto al contorno del pilote. Por supuesto, el ensayo debería ser rápido y barato y no debería interferir con el ritmo normal de la obra. Los resultados deberían tenerse en un breve plazo de tiempo, incluso si es posible en obra para no retrasar su ejecución, y ser lo suficientemente claros.

Quizás se debería considerar que como primera valoración, y siempre dejando la posibilidad de un segundo análisis en gabinete, en la misma obra se produjera la propuesta de aceptación o rechazo del elemento. Aceptar el pilote sería sencillamente asegurar la concordancia en comportamiento sobre unos valores teóricos y sería realizada "in situ", dejando la valoración del rechazo del elemento a un análisis más detallado. En obra solamente se debería de considerar un rechazo provisional en espera de un análisis detallado.

Como se ha indicado en el apartado anterior, previamente a la auscultación de pilotes o pantallas, deben recabarse datos geométricos y de ejecución para poder exigir una primera evaluación en obra. Por tanto, antes de la ejecución de los ensayos se debe disponer de todos los datos de proyecto y ejecución.



CEDEX

Los ensayos que se describen en este documento tienen sus limitaciones como se muestra más adelante, pero proporcionan abundante información relativa a la homogeneidad del hormigón de los pilotes. En algunos casos estará limitada la utilización de un determinado método por encontrarse hormigonada la viga de atado encima de la cabeza, no estar instalados o estar atascados los tubos de auscultación etc.. y habrá que combinar varias técnicas o recurrir a técnicas más específicas.

Los métodos de Transparencia Sónica, Eco e Impedancia Mecánica, para comprobar la integridad de pilotes, no entorpecen de forma significativa la ejecución de la cimentación. Para realizar el ensayo de Transparencia Sónica es necesario instalar al menos un par de tubos solidarios con la armadura, sin embargo esto no suele complicar mucho el trabajo de montaje de la ferralla. También es necesario rellenar los tubos con agua y por tanto ésta tiene que estar disponible y en cantidad suficiente ya que el volumen necesario para rellenar y mantener el nivel no es despreciable.

Por el contrario para realizar los ensayos de Eco o de Impedancia Mecánica no es necesario tenerlo previsto durante la ejecución de los pilotes. En cambio hay que descabezar el pilote y en su caso regularizar pequeñas zonas de la superficie en donde se coloquen el geófono o acelerómetro y donde pueda golpear el martillo adecuadamente, por lo que sería conveniente tenerlo en cuenta en el cronograma de la obra.

La rapidez con la que se realizan los ensayos de integridad de pilotes, y sobre todo con la que se interpretan, es un aspecto fundamental en el plan de obra. Demoras en una decisión de aceptación o rechazo pueden llegar a ocasionar importantes trastornos económicos, por lo que habrá que poner especial interés en este segundo aspecto. En la mayor parte de las ocasiones no se puede esperar mucho tiempo a conocer los resultados de la totalidad de los pilotes para continuar con los encepados y el resto de la estructura.

Realmente ahora, con las técnicas de transmisión de datos la respuesta positiva sobre el estado de una cimentación puede ser rápida y debe considerarse esta premura en la resolución del estado de integridad de la cimentación a la hora de contratar estos ensayos.



**CEDEX**

Cuando se elige un método de ensayo conviene conocer el tipo de limitaciones expuestas, no sólo respecto a la preparación sino también en relación con la interpretación de resultados y por tanto con la demora que puede provocarse en la marcha de la obra.

Con la Transparencia Sónica, por ejemplo, siempre es posible extender los tubos por encima del encepado, e incluso realizar los ensayos con el encepado construido. Si se encuentra algún defecto y es necesario realizar algún arreglo se puede continuar con la construcción, ya que siempre se pueden volver a realizar ensayos de comprobación si los tubos están accesibles. Sin embargo, si el encepado está construido no se pueden realizar ensayos de Eco o de Impedancia Mecánica y por lo tanto no conviene construir los encepados hasta que se confirme que los pilotes carecen de defectos.

Sobre este punto hay que indicar que en algunos casos se tiene tendencia a realizar los encepados y vigas de atado para continuar con la obra tapando la cabeza de los pilotes y pantallas, incluso con los tubos que en el caso de la Transparencia Sónica tuvieran instalados. Si los encepados o vigas de atado han sido hormigonados y no se han prolongado los tubos por encima de ellos, se perderá la oportunidad de ensayar el pilote o la pantalla en primera instancia o de analizar la efectividad de una reparación, y además en estas condiciones no se pueden hacer ensayos de Eco y/o Impedancia Mecánica con resultados explotables. Si en estas condiciones se quisiera ensayar los pilotes a pesar de todo, habría que realizar costosos ensayos de Sísmica Paralela o Ultrasismicidad, los cuales se describen en un punto específico de este documento.

Por lo tanto a la hora de elegir un método para verificar la integridad de pilotes conviene tener en cuenta todos los aspectos anteriores. Normalmente para grandes diámetros y pilotes o pantallas continuas que alcanzan profundidades importantes, el método más apropiado es la Transparencia Sónica. En pilotes de pequeños diámetros con esbelteces pequeñas ( $L/D \leq 30$ ), los métodos más apropiados son el Eco o la Impedancia Mecánica. Realmente, siempre que sea posible, el método más recomendable desde el punto de vista de la rápida interpretación es el de la Transparencia Sónica. Pero no siempre es posible instalar tubos en pilotes, o a veces se toma la decisión de realizar ensayos cuando se sospecha que se ha producido alguna ano-



malía durante la ejecución y ya no es posible instalar los tubos. En estos casos, queda la posibilidad de recurrir a la Impedancia Mecánica o al ensayo por Eco.

Cuando se intuya la posible presencia de anomalías en los pilotes a ensayar, y los elementos no dispongan de tubos de auscultación para realizar Transparencia Sónica se podrían realizar ensayos de Impedancia Mecánica y Eco, combinando toda la información que proporcionen ambos métodos a la vez. Con la ejecución e interpretación de ambos métodos y enlazando todos los parámetros de medida posible (longitud, movilidad, rigidez, etc...) como se verá en puntos siguientes, la fiabilidad de los ensayos puede ser mayor.

Hay que hacer hincapié en que no tiene por qué limitarse el control a la utilización de un solo método. En ocasiones, disponer de un detalle del interior del hormigón con Transparencia Sónica y conocer las reacciones con el terreno mediante Impedancia Mecánica es muy interesante y proporciona detalles de cómo se están ejecutando los pilotes en obra.

## **1.6. Número de pilotes o módulos de pantalla a ensayar**

Una vez decidido el método o métodos a emplear para el control de pilotes y pantallas, tras conocer las ventajas y limitaciones de cada uno de ellos, un apartado importante será definir el número de pilotes que se van a ensayar.

Dada la vaguedad de la normativa referida a la ejecución de pilotes y pantallas, que contempla la realización de estos ensayos no destructivos de cimentaciones profundas, generalmente el número de pilotes a ensayar se indica en proyecto. La decisión sobre el tipo de control y número de ensayos a realizar debería tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La categoría geotécnica de la obra.
- El tamaño del pilote (diámetro y profundidades).
- El tipo de pilote (en seco, con camisa, con lodos, perforado, barrenado, etc.).
- La disposición de los pilotes en el encepado, en grupo o individual.



CEDEX

- El tipo de cargas que soportará la cimentación y las condiciones de diseño (resistencia por fuste, punta o ambas).
- Conocimiento del entorno geotécnico y de las dificultades constructivas.
- Y muy importante, la experiencia y maquinaria de que dispone la empresa de cimentación.

El Ministerio de Transporte francés, para obras civiles indica, en la publicación “Pieux Forés recueil des regles de l’art” que se cita en la bibliografía, el número de pilotes a ensayar, en función del número de pilotes de que consta la obra, de la forma de trabajo del pilote y del número de pilotes por encepado (en grupos mayores o menores de cuatro) según la tabla siguiente:

**TABLA 1.1.- PORCENTAJE DE PILOTES A ENSAYAR (MINISTERIO DE TRANSPORTE FRANCÉS)**

Forma de trabajo del pilote	Nº total de pilotes	Porcentaje a ensayar	
		Cuatro o menos pilotes por encepado	Más de cuatro pilotes por encepado
Fuste	≤ 50	100 %	Entre 50 y 100 %
Fuste	> 50	100 %	Entre 50 y 100 %
Fuste y punta	≤ 50	100 %	Entre 50 y 100 %
Fuste y punta	> 50	Entre 50 y 100 %	Entre 50 y 100 %
Punta	≤ 50	100 %	Entre 50 y 100 %
Punta	> 50	Entre 50 y 100 %	Entre 50 y 100 %

Si se opta por utilizar la Transparencia Sónica, la decisión debe tomarse con el tiempo suficiente para permitir al contratista instalar los tubos de auscultación. En obras de importancia en las que se sospeche que las condiciones de ejecución de la cimentación serán difíciles, incluso es recomendable instalar tubos de auscultación en el 100 % de los pilotes, aunque a priori sólo se pretenda ensayar una parte del conjunto. Si se detectan defectos en los pilotes ensayados, siempre se pueden auscultar el resto de los pilotes y adoptar las medidas oportunas con conocimiento de causa. En un encepado de varios pilotes en el que se ha encontrado un defecto en un pilote, las medidas correctoras pueden ser mucho más relajadas si se puede asegurar que el resto de los pilotes del encepado se encuentran libres de defectos que si se desconoce el estado de esos pilotes. El ahorro económico que puede suponer adoptar una medida



CEDEX

correctora u otra, puede compensar ampliamente el coste de instalar los tubos en la totalidad de los pilotes.

En las normas UNE-EN 1536 (pilotes perforados) y UNE-EN 1538 (muros-pantalla) se citan los ensayos no destructivos de cimentaciones profundas pero sin mencionar cuantos elementos deben ensayarse. En estos documentos se recogen los siguientes puntos:

*“Se deberían llevar a cabo ensayos de integridad para documentar la calidad de cualquier pilote en el que se haya sumergido de nuevo el tubo-tremie o se haya realizado una junta de construcción”.*

*“Las pruebas dinámicas y los ensayos de integridad se ejecutarán con un equipo fabricado y aprobado para este fin, los resultados serán interpretados por personas competentes en este campo, conocedoras también de las técnicas de piloteje y experimentadas en las características específicas del terreno”.*

*“Los aparatos se utilizarán observando las instrucciones del fabricante y el pilote será adecuadamente preparado para la prueba”.*

Queda a criterio del Director de Obra el número de unidades a ensayar.

El PG-3 en el apartado 671.4, cita:

*“Sobre alguno de los pilotes de prueba, o bien sobre cualquiera de los de trabajo, se efectuarán las pruebas de carga y los ensayos sónicos, de impedancia mecánica o cualquier otro previsto en el Proyecto u ordenado por el Director de las Obras.*

*En el caso de pilote aislado bajo un pilar se recomienda equipar todos los pilotes para su posible comprobación, y llevar a cabo pruebas del tipo señalado en, al menos, un (1) pilote de cada tres (3)”*



CEDEX

En el Código Técnico de la Edificación se hace referencia a los métodos de control de integridad de pilotes en los siguientes puntos:

- Se permite efectuar pilotes hormigonados “in situ”, aislados, en las siguientes condiciones:
  - $0,45\text{ m} < \text{Diámetro} < 1,00\text{ m}$ ; se podrán realizar pilotes aislados siempre que se realice un arriostramiento en dos direcciones ortogonales y se asegure la integridad del pilote en toda su longitud de acuerdo con los métodos de control recogidos en el apartado 5.4.
  - $\text{Diámetro} > 1,00\text{ m}$ ; se podrán realizar pilotes aislados sin necesidad de arriostramiento siempre y cuando se asegure la integridad del pilote en toda su longitud de acuerdo con los métodos de control recogidos en el apartado 5.4 y se arme para las excentricidades permitidas y momentos resultantes.
- Con un control adecuado de la integridad, los pilotes perforados podrán ser utilizados con topes estructurales un 25% mayores.
- En el capítulo de control de pilotes se recogen los siguientes aspectos relativos a los ensayos de integridad:

*Los ensayos de integridad tienen por objeto verificar la continuidad del fuste del pilote y la resistencia mecánica del hormigón.*

*Pueden ser, según los casos, de los siguientes tres tipos:*

- a) transparencia sónica;*
- b) impedancia mecánica;*
- c) sondeos mecánicos a lo largo del pilote.*

*Además, se podrá realizar un registro continuo de parámetros en pilotes de barrena continua.*

*El número y la naturaleza de los ensayos se fijarán en el Pliego de condiciones del proyecto y se establecerán antes del comienzo de los trabajos. El número de ensayos no debe ser inferior a 1 por cada 20 pilotes, salvo en el caso de pilotes aislados con diámetros entre 45 y 100 cm que no debe ser inferior a 10*



CEDEX

*por cada 20 pilotes. En pilotes aislados de diámetro superior a 100 cm no debe ser inferior a 5 por cada 20 pilotes.*

En la decisión del tipo y número de control a realizar, sea por parte de la propiedad, el contratista o la empresa de control, también se debe tener en cuenta cuáles son las condiciones que favorecen la formación de defectos: niveles de diseño de alto riesgo, condiciones geotécnicas del suelo y de las aguas subterráneas complejas, etc..., para que se aplique en cada caso el método de control adecuado.

También es interesante que el porcentaje de pilotes a ensayar sea mayor al inicio de los trabajos de cimentación descendiendo posteriormente una vez que se ha comprobado la eficacia del método de ejecución para las condiciones particulares de obra.

### **1.7. Problemas de construcción de los pilotes**

En el presente apartado se analizan con detalle los defectos que se pueden producir en la ejecución de los pilotes. Un buen conocimiento de las incidencias que pueden ocurrir durante la realización de esta unidad de obra, permitirá efectuar una interpretación mejor de los ensayos de control que se realicen. Asimismo permitirá también proponer investigaciones complementarias ajustadas, en el caso de que se detecten defectos, y reparaciones o tratamientos de mejora.

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 hormigonado, desprendimientos, puntas contaminadas, deslavado del hormigón, zonas 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.



CEDEX

### **1.7.1. Roturas en cabeza de los pilotes**

Las roturas en cabeza de los pilotes suelen producirse en general, por accidentes causados por el movimiento de la propia maquinaria de pilotar cuando se desplaza de un sitio a otro o por otra maquinaria pesada. También pueden producirse roturas en cabeza por descuidos durante el descabezado de los pilotes por el uso de maquinaria excesivamente potente.

Este tipo de roturas son fáciles de detectar con cualquiera de los métodos de control al encontrarse a poca profundidad. Si los pilotes se ensayan mediante Transparencia Sónica, antes de realizar el descabezado, se corre el riesgo de que la rotura se produzca con posterioridad al ensayo y por tanto pase inadvertida. En los métodos de Eco o de Impedancia Mecánica los ensayos se realizan una vez descabezado el pilote y no se corre ese riesgo. Si se sospecha que se ha producido este tipo de roturas cerca de la cabeza, se puede obtener una rápida evaluación del conjunto de los pilotes comparando el valor de la rigidez dinámica y la admitancia por el método de Impedancia Mecánica ya que variaciones significativas de estos parámetros son determinantes de la presencia de este tipo de defectos.

### **1.7.2. Cortes de hormigón**

Como corte de hormigón se entiende una “interrupción significativa” en el pilote. En el apartado en que se describen los métodos de auscultación se muestra la importancia de que como tal se defina.

Juntas o cortes de hormigonado 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 tremie 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 tremie. Con estas incidencias se ocasiona una discontinuidad y una zona con hormigón contaminado generalmente importante. Este tipo de defecto se detecta sin problemas con la Transparencia Sónica, determinándose fácilmente su localización y extensión en función de su espesor y posición de las sondas en el ensayo. También pueden detectarse con los ensayos de Eco y de



Impedancia Mecánica siempre que los espesores que tengan las anomalías sean significativos, 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.

### **1.7.3. Estricciones, estrechamientos o cuellos de botella**

Estas anomalías deben entenderse como una “reducción de sección significativa” en el pilote, pero que sin embargo no ocasionan una interrupción completa de la continuidad. El objeto del ensayo de integridad será identificarla y situarla lateralmente 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 la entubación, lo que genera estrechamientos en el fuste del pilote. Este tipo de defecto se detecta fácilmente en los barridos perimetrales de la Transparencia Sónica y más adelante se mostrará cómo se puede evaluar la afección a la integridad. También se puede detectar con los ensayos de Eco y de Impedancia Mecánica si la reducción de sección es importante (del orden del 25 % o superior) dependiendo de las condiciones 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



CEDEX

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 la Transparencia Sónica 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.

#### **1.7.4. 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 (2) diámetros, que impida la entrada del terreno circundante”*

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 la Transparencia Sónica, si éstos afectan a los trayectos que se investigan. Se pueden detectar las profundidades entre las que se sitúa la inclusión y su situación en planta con mucha precisión. Con los ensayos de Eco y de Impedancia Mecánica se observarán las inclusiones si el derrumbe provoca una variación de sección significativa como se analiza muy detalladamente en la descripción del método. Es imposible, sin embargo, con Eco o Impedancia Mecánica evaluar la extensión y situación en planta de la inclusión que se produzca.

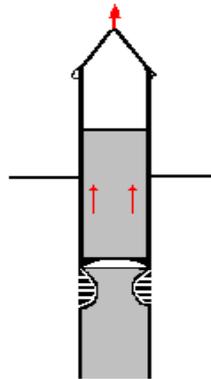


FIG. 1.1.- DEFECTO AL EXTRAER LA ENTUBACIÓN

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 las técnicas de Eco e Impedancia Mecánica, se podrán detectar varias o sólo la de menor profundidad y será difícil valorar en sección su afección real a la integridad del pilote.

Los depósitos en el fondo de excavación son detectables con la Transparencia Sónica. Para analizar si el comportamiento del pilote en punta es de tipo empotramiento o libre en punta se podrían utilizar las técnicas de Eco y de Impedancia Mecánica si la esbeltez es adecuada.



CEDEX

### **1.7.5. 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 tremie hasta el fondo. 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 la Transparencia Sónica que permite conocer con bastante precisión la zona afectada. Con los ensayos de Eco y de Impedancia Mecánica 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.

### **1.7.6. 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 de la Transparencia Sónica 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 hormi-*



*gonado, 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.

### **1.7.7. 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 ni 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. Este documento intenta en cierta medida evitar esta situación y propone un parte en el **anejo 1** que permita, en el caso de la aparición de defectos, analizar cuáles han podido ser las causas.

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.

Michael W. O’Neill en “Construction Practices and Defects in Drilled Shafts” (1991) realiza una clasificación muy razonada de defectos. En base a este trabajo 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 resultado de una mala utilización de lodos bentoníticos
5. Producidos en la fase de hormigonado



CEDEX

a) Defectos relacionados con problemas constructivos

Dentro de este grupo de defectos los más comunes son los provocados por manipulación del tubo tremie. Se incluirían 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 tremie, 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 incluirían otros que ya no son tan comunes o que las nuevas técnicas han provocado su desaparición, como el hormigonar con caída libre del hormigón, excavar un pilote próximo a otro recién hormigonado, etc.

b) 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 de Transparencia Sónica deberá estar reflejado en el parte.

c) 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 no 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 1.2 se representa un posible proceso de formación de una pérdida de sección en un pilote ejecutado con camisa recuperable.

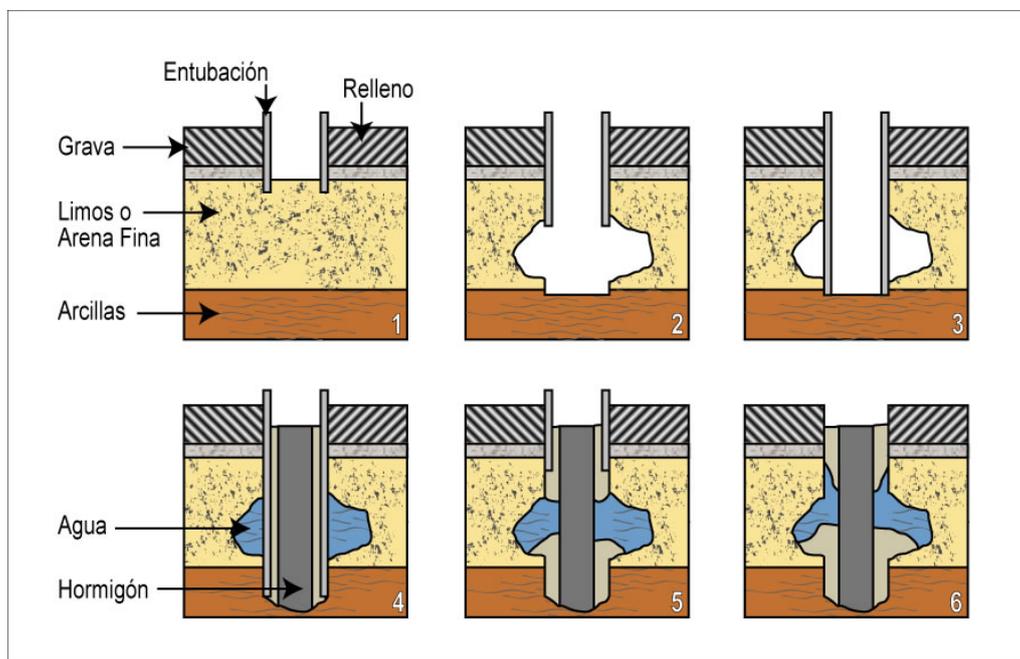


FIG 1.2.- DEFECTO EN PILOTE EJECUTADO CON CAMISA RECUPERABLE (FLEMING, 1992)

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 la Transparencia Sónica se



CEDEX

muestran ligeras diferencias en la velocidad de propagación entre la altura de 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.

d) Defectos resultado de una mala utilización de lodos bentoníticos

Los defectos asociados a pilotes excavados utilizando lodos bentoníticos suelen estar provocados por el mal uso de los lodos. . Una buena ejecución hace que no tengan porqué estar penalizados 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 mud cake en estratos granulares que pueden producir importantes estricciones.

e) 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 curado antes de lo previsto dentro del tremie 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 poca maniobrabilidad 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 técnica de hormigonado con tubería tremie y hormigón sumergido.
- 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.

Sliwinski, Z. J. y Fleming W. G. K., en 1982 realizaron un estudio sobre una muestra de 5.000 pilotes. Del 100 % de los defectos detectados, considerando exclusivamente los que afectaban al menos a  $\frac{1}{4}$  de la sección del pilote, un 58 % estaban provocados por un descabezado inadecuado o por el movimiento de maquinaria alrededor de los pilotes, un 25 % mostraban contaminación en los 2 primeros metros, y el resto (un 17 %) eran debidos a contaminación entre 2 y 5 metros de profundidad, o debido a la baja calidad del hormigón en el fuste o coqueras.

Estos datos realmente hay que tomarlos con mucho cuidado ya que los métodos de control empleados por ellos detectan preferiblemente defectos que se encuentran cerca de la superficie. De la experiencia de control sobre los pilotes realizados en España, del mayor grupo que consideran Sliwinski y Fleming, los casos son rarísimos 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. El 25 % de defectos que consideran que aparecieron en los 2 primeros metros de la cabeza se muestra claramente en los pilotes que se ensayan con el método de Transparencia Sónica; sin embargo estos defectos se eliminan con el descabezado hasta la cota de proyecto. No se suelen observar en los pilotes ensayados con Eco o Impedancia Mecánica, ya que estos ensayos requieren que los pilotes se encuentren descabezados cuando se realiza el ensayo.

Aunque no se disponga de datos estadísticos hay que señalar que los defectos en el fuste por caída de material, coqueras o contaminación, son más comunes de lo que consideran los autores, aunque bien es cierto que la sección afectada en la mayoría de los casos no alcanza  $\frac{1}{4}$  de la sección del pilote. En esta evaluación estadística no se consideran los defectos en punta



CEDEX

cuando se ha constatado a través del método de Transparencia Sónica que son los defectos más abundantes en cualquier tipo de pilotes de extracción, lo que muestra claramente que el registro de defectos se ha realizado con técnicas de control que sólo evalúan los primeros metros.

## **1.8. Definición de anomalías, fallos y defectos**

Hasta el momento se ha hablado de defectos y de cómo se producen. Definir claramente que es un defecto es esencial ya que la capacidad que tiene un método de ensayo para determinar el mayor número posible de defectos y su localización en el pilote, es la característica más importante que hay que valorar. No hay situación más frustrante para un ingeniero responsable de una obra o aquel que tiene que revisar una cimentación, que la de encontrarse con un informe que indica que existe una anomalía en un pilote pero no se proporcionan datos sobre el tipo de defecto, ni su localización y extensión.

Es habitual en los ensayos no destructivos hablar de “ANOMALIA” como desviación de la forma normal del registro del ensayo. Eliminando las anomalías que pudieran ser debidas a una mala instrumentación, preparación o calidad del ensayo es necesario valorar aquellas que son debidas a un fallo real en el pilote.

Como “FALLO” se entienden las desviaciones con respecto a lo previsto en la forma o en el material constitutivo del pilote y “DEFECTO” cuando estos fallos por su tamaño o localización pueden llegar a reducir la capacidad resistente del pilote o su durabilidad.

Estas definiciones tan claras pueden no ser tan evidentes cuando se analizan los ensayos detalladamente, por lo que a lo largo de la descripción de los distintos métodos se irá valorando el análisis de anomalías en sentido amplio, no solo como se ha definido anteriormente.

En general, la Transparencia Sónica 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, la Transparencia Sónica 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.

En los apartados anteriores 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 que se indica a continuación:

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 1.3)

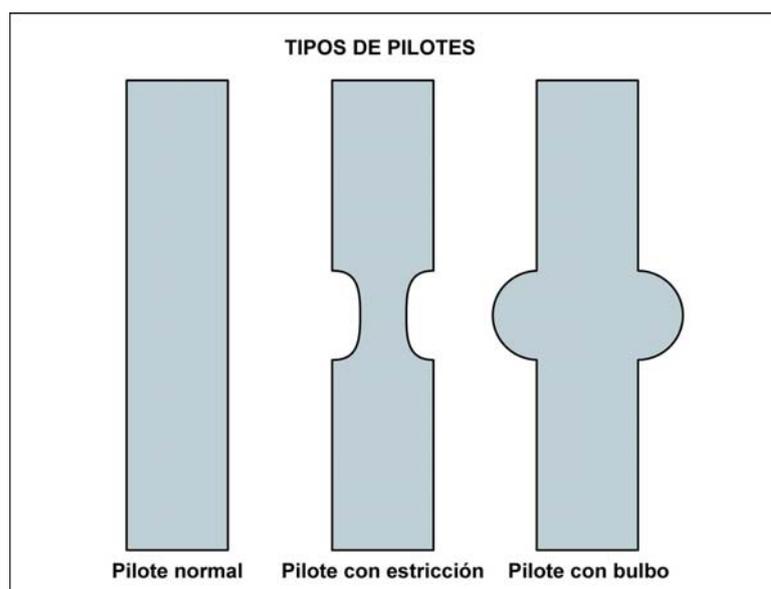


FIG. 1.3.- CAMBIOS EN LA FORMA DE LOS PILOTES

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 1.4). También se pueden producir por deslavados importantes del hormigón provocados por caudales de agua altos. Otra causa posible son la existencia de esfuerzos laterales o tensionales 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.

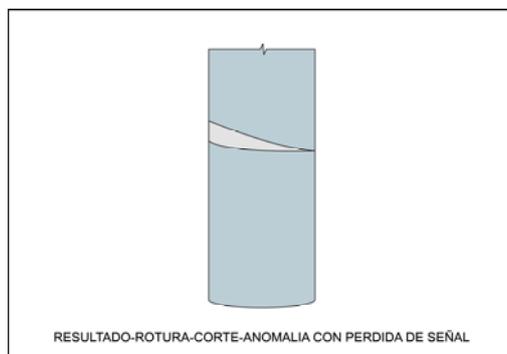


FIG 1.4.- CORTES EN EL PILOTE

3. Cambios en las propiedades internas del pilote. Se trataría de los defectos producidos exclusivamente por el hormigón o en el hormigonado. Los cambios en las propiedades del hormigón o la presencia de inclusiones pueden ser tanto progresivos como acusados (figura 1.5). También pueden producirse por procesos degradación del hormigón, ataque químico del hormigón o del acero o deslaves.



FIG. 1.5.- VARIACIONES EN LA CALIDAD DEL HORMIGÓN

4. Punta. Se trataría de un caso especial del apartado 3 cuando se localiza en el fondo del pilote. Como sobre estos defectos se puede realizar un análisis detallado en la variación de las propiedades del material que las constituye en pro-



CEDEX

fundidad, con el ensayo de Transparencia Sónica, se tratará específicamente en el capítulo de este método.

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 técnicas propuestas en este documento.

## **1.9. 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.

Se debe exigir a las empresas de control que el personal que realice los ensayos, incluya al menos un titulado con experiencia y criterio para analizar los primeros resultados en obra, de forma que la interpretación sea lo más rápida y precisa. Así mismo, se debe exigir al contratista que proporcione todos los datos necesarios para realizar una buena interpretación.



**CEDEX**

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.

### **1.10. 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 condicionantes 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 medi-



da 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 que pueden estar asociadas a su proceso de extracción y nos darán información para programar una reparación.

Sobre el sondeo pueden efectuarse asimismo ensayos de permeabilidad similares al ensayo Lugeon. Cerrando con válvulas a distintas profundidades 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 sin embargo no son la panacea que todo lo soluciona. 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



**CEDEX**

- 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.

## 2. TRANSPARENCIA SÓNICA EN PILOTES Y PANTALLAS

### 2.1. Principios del método

El método de la Transparencia Sónica para el control de cimentaciones consiste en el seguimiento a todo lo largo del fuste del pilote o de la pantalla, del tiempo que tarda en propagarse una onda de presión (llamada comúnmente onda sónica) desde un emisor a un receptor que están colocados en posiciones conocidas.



FIG. 2.1.- EQUIPO DE TRANSPARENCIA SÓNICA



CEDEX

Si el emisor y el receptor están separados una distancia  $L$ , el tiempo  $t$ , que tarda el tren de ondas en propagarse desde el emisor al receptor a través del hormigón es:

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

siendo  $c$ , la velocidad de propagación de las ondas de presión en un medio infinito, elástico e isótropo.

La relación que existe entre la velocidad de las ondas con las constantes del medio en el que éstas se propagan es la siguiente:

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

siendo:  $E$ : Módulo de elasticidad dinámico del material

$\rho$ : Densidad del material

$\nu$ : Coeficiente de Poisson

Al combinar ambas ecuaciones se observa que si la distancia entre el emisor y el receptor,  $L$ , es una constante, el tiempo de propagación de la onda es función de las propiedades del material,  $E$ ,  $\rho$  y  $\nu$ . Esto muestra que variaciones en la velocidad de propagación indicarán variaciones en las propiedades del material.

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.



## **2.2. Método de ensayo. Denominación**

La Transparencia Sónica es el método más usual para el control de la integridad de pilotes de gran diámetro y pantallas "in situ". En el caso de las pantallas, además, es el único aplicable comúnmente (la alternativa consistiría en la ejecución de ensayos especiales, que requerirían una instrumentación específica y compleja). No tiene limitaciones por la forma del elemento que se ensaya, frente a los ensayos de Impedancia Mecánica o Eco que por el contrario sólo pueden utilizarse en elementos de tipo pilotes como se analizará en el capítulo 3.

El término Transparencia Sónica parece el más adecuado para denominar a este método. También se le conoce como Sondeo Sónico, traducción directa del francés "Carottage Sonique". El método fue desarrollado en Francia por el CEBTP (Centre Experimental de Recherches et d'Etudes du Batiment et des Travaux Publics) a finales de los años 60. En inglés se conoce como "Cross-Hole Sonic logging" o también "Sonic Coring". Aunque en España se emplean en algunas ocasiones estos términos anglosajones para denominar al ensayo, como Cross-Hole, parece menos adecuado que Transparencia Sónica. Actualmente la asociación del término Transparencia Sónica a las cimentaciones especiales es inmediata, frente al término Cross-Hole que se utiliza más para nombrar los ensayos geofísicos clásicos de sismicidad en terrenos.

En nuestro país, aparte de algunos trabajos iniciales de investigación realizados por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, los primeros ensayos de control sistemático de pilotes en Obra Civil se realizaron a finales de los años 80. Las primeras técnicas empleadas fueron la Transparencia Sónica y la Impedancia Mecánica desarrolladas durante los años 60 y 70 por Paquet en el CEBTP francés.

## **2.3. Equipos de toma de datos**

Un equipo de Transparencia Sónica estándar (figura 2.2) está compuesto globalmente por los siguientes elementos:

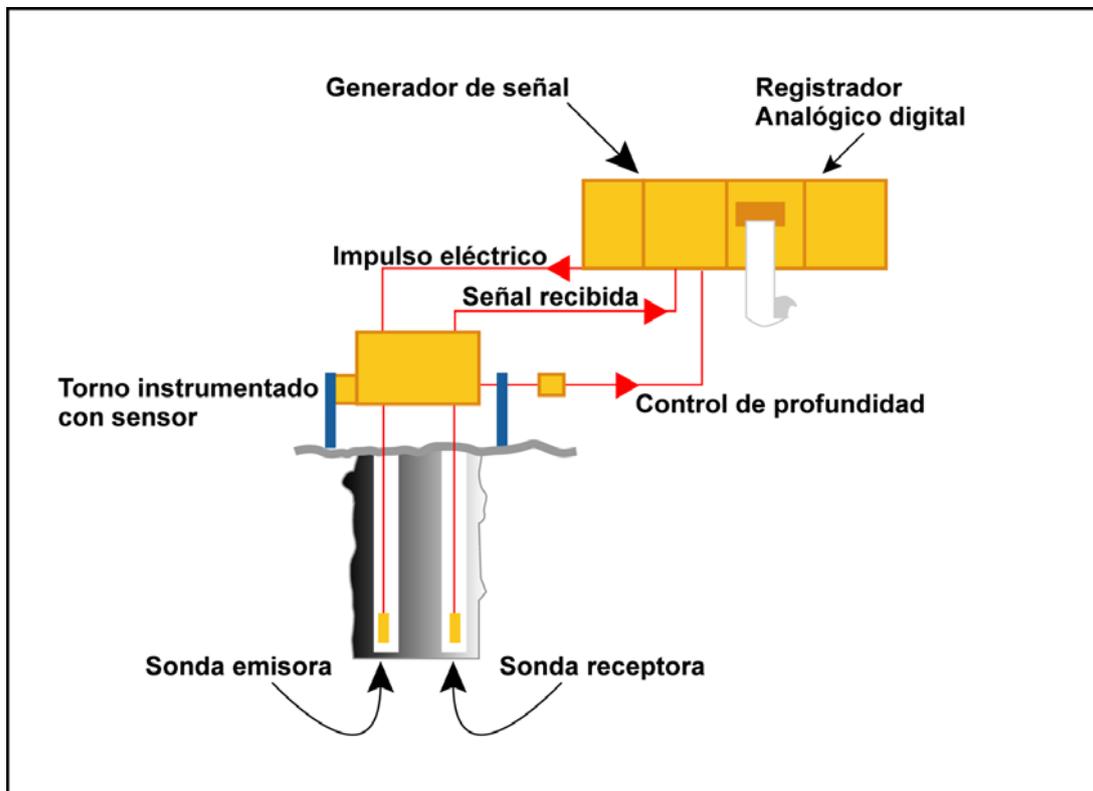


FIG. 2.2.- ESQUEMA DEL SISTEMA DEL TRANSPARENCIA SÓNICA

- Dos Sondas Piezoeléctricas, una emisora de ultrasonidos y otra receptora de dimensiones reducidas, con diámetros exteriores entre 25 y 65 mm y unos 20-25 cm de longitud (figura 2.3). Estas sondas son las que se introducen en los tubos que se habrán instalado en el pilote o la pantalla y recorrerán todo el fuste (figura 2.4).



FIG. 2.3.- SONDAS SÓNICAS

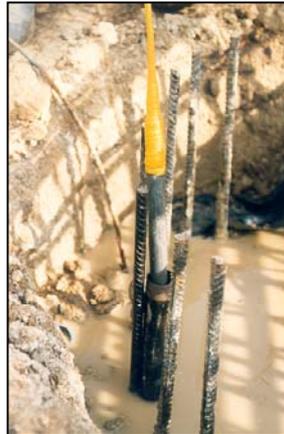


FIG. 2.4.- SONDAS EN TUBO DE AUSCULTACIÓN

- Una Unidad de Control constituida por un generador de impulsos, un osciloscopio, y un sistema de registro, visualización y almacenamiento de las señales. Los equipos además disponen de una unidad de impresión incorporada (figura 2.5) o externa. Actualmente el sistema de control con el osciloscopio puede ser analógico o un instrumento virtual digital realizado mediante software (figuras 2.6 y 2.7). La Unidad de Control realiza además las tareas de tratamiento de señal como amplificación, filtrado, etc.



FIG. 2.5.- EQUIPO DIGITAL CON IMPRESIÓN INCORPORADA



FIG. 2.6 Y 2.7.- EQUIPOS DIGITALES CON ALMACENAMIENTO DE DATOS

- 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 (figuras 2.8 y 2.9). 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.



FIG. 2.8.- TORNO DE MEDIDA DE LA PROFUNDIDAD



FIG. 2.9.- REGISTRO DE MEDIDA DE LA PROFUNDIDAD

- 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.



FIG. 2.10.- EQUIPO COMPLETO DE TRANSPARENCIA SÓNICA CON BOBINAS DE CABLE

#### **2.4. Realización del ensayo**

El ensayo se realiza introduciendo las sondas emisora y receptora en los tubos que se hayan instalado en los pilotes o pantallas o en los taladros que se hayan perforado en el hormigón.

Las sondas se introducen por los tubos previamente llenos de agua y se descienden, manteniéndolas a nivel hasta la punta del pilote. Con las sondas en el fondo y colocadas al mismo nivel se izan registrando a intervalos constantes de profundidad, el tiempo que la onda ultrasónica tarda en recorrer la distancia entre sondas, atravesando el hormigón que las separa (figura 2.11).

Durante el recorrido, las sondas se encuentran a la misma profundidad y se recogen simultáneamente, aunque en el documento se mostrarán algunas otras disposiciones especiales que no son las comunes.

Si se dispone de tubos o se han realizado taladros es posible ensayar pilotes perforados hormigonados "in situ", pozos, pantallas y todo tipo de elementos masivos de hormigón. Los tubos o taladros sólo requieren estar llenos de agua limpia antes de realizar los ensayos, para garantizar el acoplamiento de las sondas con las paredes de los conductos. Se debe asegurar



CEDEX

que el agua rebosa, manteniéndose llenos los tubos de ensayo y comprobando que no existen pérdidas para que no se produzcan errores en la interpretación.

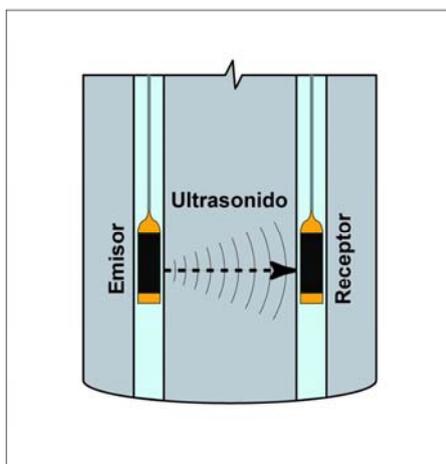


FIG. 2.11.- ESQUEMA DE MEDIDA ENTRE EMISOR Y RECEPTOR

## 2.5. Instrumentación del pilote o pantalla

Debido al propio sistema de medida, el elemento a auscultar (pilote o pantalla) debe estar instrumentado antes del ensayo, con tubos solidarios con las armaduras colocados en el interior (figura 2.14) y que dejen que la sonda pase adecuadamente. Los tubos deben permitir que las sondas estén centradas, sin producirse inclinaciones significativas respecto de la vertical.

Los tubos sobresaldrán en torno a 1 m por encima de la cota prevista del hormigón en el pilote o en la pantalla, con el fin de facilitar la puesta a nivel de las sondas y evitar la caída de material en ellos.



FIG. 2..12.- MÓDULOS DE PANTALLA INSTRUMENTADOS

## **2.5.1. Tipo de tubos de instrumentación. Número de tubos**

### **2.5.1.1. Tipo de tubos**

Los tubos que se utilizan en la Transparencia Sónica son usualmente metálicos y de un diámetro interior suficiente, que dependerá de las sondas que se vayan a utilizar. Normalmente se usan tubos de acero negro del mismo tipo de los que se utilizan en calefacción o incluso galvanizados, comercializados en tramos de 6 m que se unen mediante manguitos roscados (figura 2.13).

Los tubos de PVC proporcionan una menor adherencia con despegues con el hormigón, y en grandes profundidades pueden no soportar el empuje del hormigón. Como además los tubos no se deben deformar con las temperaturas que se alcanzan en el curado del hormigón, es más recomendable en primera instancia instalarlos metálicos. Las razones para utilizar tubos metálicos frente a tubos de PVC, aunque su coste es mayor y se pueden producir más interferencias en la señal son, la mayor rigidez para soportar el empuje del hormigón y la mejor adherencia con éste. La falta de adherencia PVC - hormigón en el contacto puede provocar ensayos que induzcan a pensar que existen anomalías.



FIG. 2.13.- TUBOS CON EMPALMES ROSCADOS

Si existe buena adherencia en los tubos de PVC, la señal es más nítida, al tener el PVC una velocidad de propagación más próxima al agua que rellena los tubos que los tubos de acero, pero los condicionantes anteriores hacen desaconsejables los tubos de PVC.



FIG. 2.14 TUBOS METALICOS INSTALADOS EN LAS ARMADURAS



FIG. 2.15 TAPÓN METÁLICO EN EL FONDO DEL TUBO

En algunos casos, puede ser necesario limpiar los tubos metálicos con algún producto desengrasante antes de la colocación, para evitar que la existencia de grasa cree problemas de adherencia entre el tubo y el hormigón.

Los tubos deben cerrarse herméticamente en su extremo inferior por medio de tapones roscados metálicos (figura 2.15) o de PVC, para impedir cualquier entrada de sedimentos del fondo, lechada o incluso hormigón y no permitir la pérdida de agua de su interior. Los extremos superiores de los tubos, que tienen que sobresalir en torno a 1 m de la cota de hormigonado, deben cerrarse también con tapones roscados para evitar caídas de material al interior que pudiesen obstaculizar el recorrido de las sondas.

Los tubos deben tener un tamaño suficiente para que pasen las sondas, pero no deben ser muy grandes ya que se obtendrán errores en el cálculo de la velocidad de propagación si es necesario obtenerla. Siempre que se desee realizar un análisis detallado de la velocidad de propagación, a lo largo del fuste, el diámetro de los tubos será bien ajustado al diámetro de la sonda o se tendrán que usar centradores si los diámetros de los tubos son muy superiores para que no se desplacen lateralmente pudiendo dificultar la medida.

Las sondas que se comercializan con este tipo de equipos tienen diámetros similares y es usual instalar tubos de acero con diámetros interiores de 31 a 50,8 mm. Los tubos deberán ajustarse al tamaño de la sonda.

### 2.5.1.2. Disposición

La disposición de los tubos en un pilote depende de su diámetro (figura 2.16). El número mínimo de tubos que se necesita para realizar el ensayo tradicional de Transparencia Sónica es de dos, aunque conviene tener cuatro o más tubos cuando el diámetro es grande, para poder realizar una buena localización en planta de las anomalías. Por cada par de tubos que se utilicen se puede realizar una diagrafía.

Para que se pueda realizar el ensayo de Transparencia Sónica de forma efectiva, rápida y que además pueda ser interpretable, es indispensable una instalación apropiada de los tubos en número y disposición.

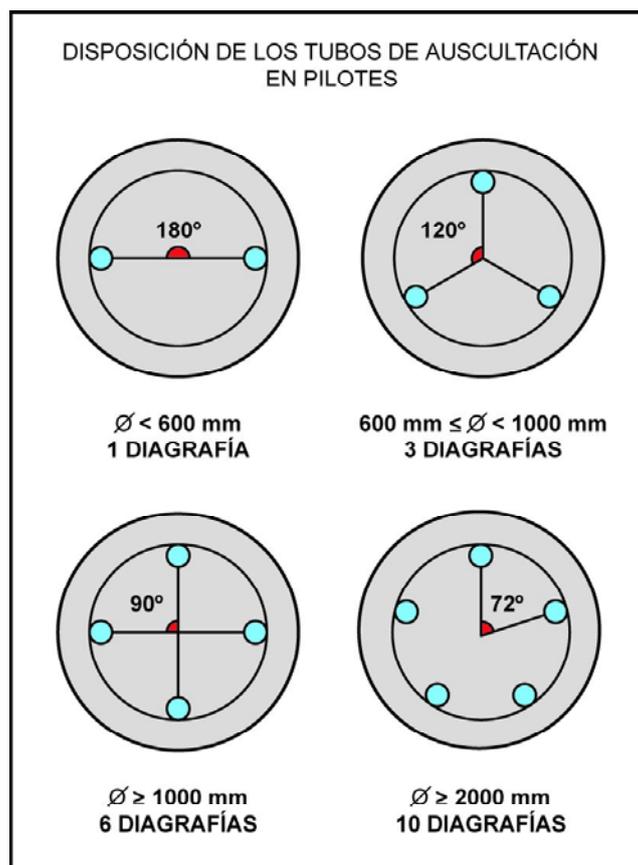


FIG. 2.16 DISPOSICIÓN DE LOS TUBOS DE AUSCULTACIÓN EN PILOTES

En los pilotes, las disposiciones más usuales son 3 (figura 2.17) y 4 tubos, ya que son el número más adecuado para los diámetros que comúnmente se ejecutan. Con cuatro tubos se pueden realizar seis diagrañas, dos centrales y cuatro perimetrales. Cuando se utilizan tres tubos sólo se pueden realizar tres diagrañas perimetrales y se deja de investigar la parte central del pilote que suele proporcionar una información muy válida en el caso de detectarse heterogeneidades.

Siempre que el diámetro del pilote y la disposición de las armaduras lo permitan, conviene utilizar cuatro tubos en lugar de tres, al disponerse de dos diagrañas que barren el alma central del pilote.



FIG. 2.17.- INSTALACIÓN DE 3 TUBOS EN PILOTE

Normalmente el número y disposición de los tubos en los pilotes viene definido en proyecto en función del diámetro del pilote. En España se utilizan comúnmente, si no hay nada estipulado, los indicados en la tabla siguiente:

TABLA 2.1.- NÚMERO Y DISPOSICIÓN DE LOS TUBOS EN LOS PILOTES

DIÁMETRO	Nº MÍNIMO DE TUBOS	DISPOSICIÓN
$\varnothing < 600 \text{ mm}$	No se realizan ensayos de Transparencia Sónica	
$\varnothing \geq 600 \text{ mm}$	3	120°
$\varnothing \geq 1000 \text{ mm}$	4	90°
$\varnothing \geq 2000 \text{ mm}$	A determinar	A determinar



CEDEX

En Francia se recomienda disponer 2 tubos para  $\varnothing < 600$  mm, 3 tubos para  $\varnothing < 1200$  mm y 4 tubos si el diámetro es superior a 1200 mm, con una limitación en cuanto a que no se pueden realizar diagrfias entre tubos con distancias menores de 0,3 m y mayores de 1,5 m. En el caso francés los valores antes presentados son una exigencia normativa y las normas siempre son de mínimos.

En el Reino Unido, para pilotes con diámetros entre 600 y 750 mm el número de tubos es 3 y para mayores de 750 mm se instalan 4 tubos. Los pilotes con diámetros inferiores de 600 mm no se suelen ensayar por medio de esta técnica.

En la norma ASTM se indica que se instrumentará con un tubo cada 0,25 o 0,30 m de diámetro y con un mínimo de 3 tubos. Se instalan 3 tubos para  $\varnothing < 1000$  mm, 4 tubos para  $1000$  mm  $< \varnothing < 1400$  mm y 6 tubos para  $1500$  mm  $< \varnothing < 2100$  mm.

La instrumentación con un mínimo de 2 tubos en pilotes de diámetro inferior de 600 mm puede provocar problemas a la hora del hormigonado, ya que al instalarse los tubos dentro de las armaduras no queda suficiente espacio para introducir el tubo tremie. En estos casos es más sencillo realizar un ensayo tipo Impedancia Mecánica o de Eco. Para diámetros pequeños tiene gran incidencia mucho sobre el coste total de la cimentación, el propio coste que supone una instrumentación exagerada con instalación de tubos.

La disposición de tubos en pantallas puede ser muy variada y dependerá del ancho y canto de la pantalla, así como de la potencia que tenga la sonda emisora y del grado de control que se quiera realizar (figura 2.18). En el gráfico adjunto se presentan algunas disposiciones usuales en pantallas. Realmente no se deberían realizar barridos a distancia mayor de 2,5 m para respetar los límites de medida de los equipos más comunes, en especial si el barrido es paralelo al borde del elemento. En estas condiciones para distancias muy elevadas y en diagrfias de borde, se pueden producir irregularidades que dificulten la interpretación.

Con las disposiciones en la pantalla que se muestran en la figura 2.18 se intenta que la medida entre dos tubos de auscultación implique el máximo volumen de pantalla. Esto significa que siempre será más interesante realizar un barrido entre dos tubos cruzados que entre 2 tubos que definan una línea paralela al canto de la pantalla.

El tubo más próximo a la junta entre batches comúnmente se separa una distancia de al menos 30 cm, ya que los defectos de junta pueden enmascarar el estudio de integridad de la pantalla. Siempre será posible en cualquier caso observar el estado de la junta realizando un ensayo entre los tubos de dos módulos contiguos. La auscultación de las juntas entre módulos de pantalla debe sin embargo analizarse como un ensayo especial, ya que la interpretación de las diagrfias de juntas no es tan sencilla como aquellas que barren el núcleo de la pantalla. No obstante, en batches realizados con hidrofresa en los que se espera una impermeabilización muy alta es muy interesante hacer este tipo de diagrfias de control de juntas, para observar si se detectan irregularidades que pudieran comprometer la estanqueidad del recinto.

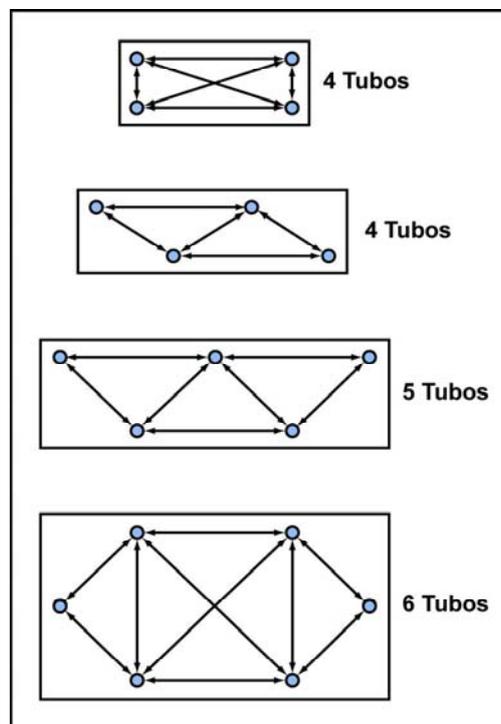


FIG. 2.18.- DISPOSICIONES DE TUBOS EN PANTALLAS EN FUNCIÓN DEL ANCHO Y EL CANTO

### 2.5.1.3. Sistemas de fijación

Los sistemas de fijación de los tubos a la ferralla deben ser lo más sólidos posibles para resistir el “empuje” del hormigón sobre los tubos durante el hormigonado (figuras 2.19 y 2.20). Para limitar la deformación de los tubos, tanto durante la bajada de la armadura como durante el hormigonado, la fijación se recomienda realizarla a intervalos de alrededor de 3 m como máximo. En la figura 2.19 se muestra un ejemplo de sistema de fijación de los tubos a la armadura que da buen resultado.

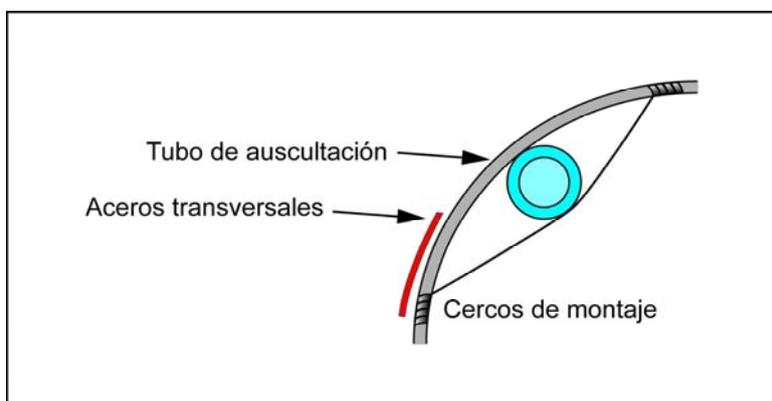


FIG. 2.19.- FIJACIÓN DE LOS TUBOS DE AUSCULTACIÓN A LA ARMADURA



FIG. 2.20.- FIJACIÓN DEL TUBO DE AUSCULTACIÓN

No es muy adecuado realizar el empalme por medio de soldadura, ya que no se puede asegurar una buena continuidad lineal del espacio reservado para las sondas de auscultación y en

algunas ocasiones se producen en la soldadura desbordamientos o descuelgues que impiden el libre paso de las mismas.



FIG. 2.21 TUBOS COLOCADOS ANTES DE DESCENDER LA ARMADURA

#### **2.5.1.4. Instalación de los tubos para investigación detallada de la punta**

Suele ser común en algunas administraciones o con determinados clientes, que en proyecto ya se prevea realizar un sondeo mecánico de la punta del pilote o la pantalla para investigar el contacto, utilizando uno de los tubos que sirven para la auscultación sónica. En este caso, uno de los tubos se instalará con diámetro 100 mm y se dejará 50 cm por encima de la base de la armadura o del fondo de excavación (figura 2.22). El motivo es poder recuperar posteriormente un testigo del contacto pilote-suelo o pantalla-suelo.

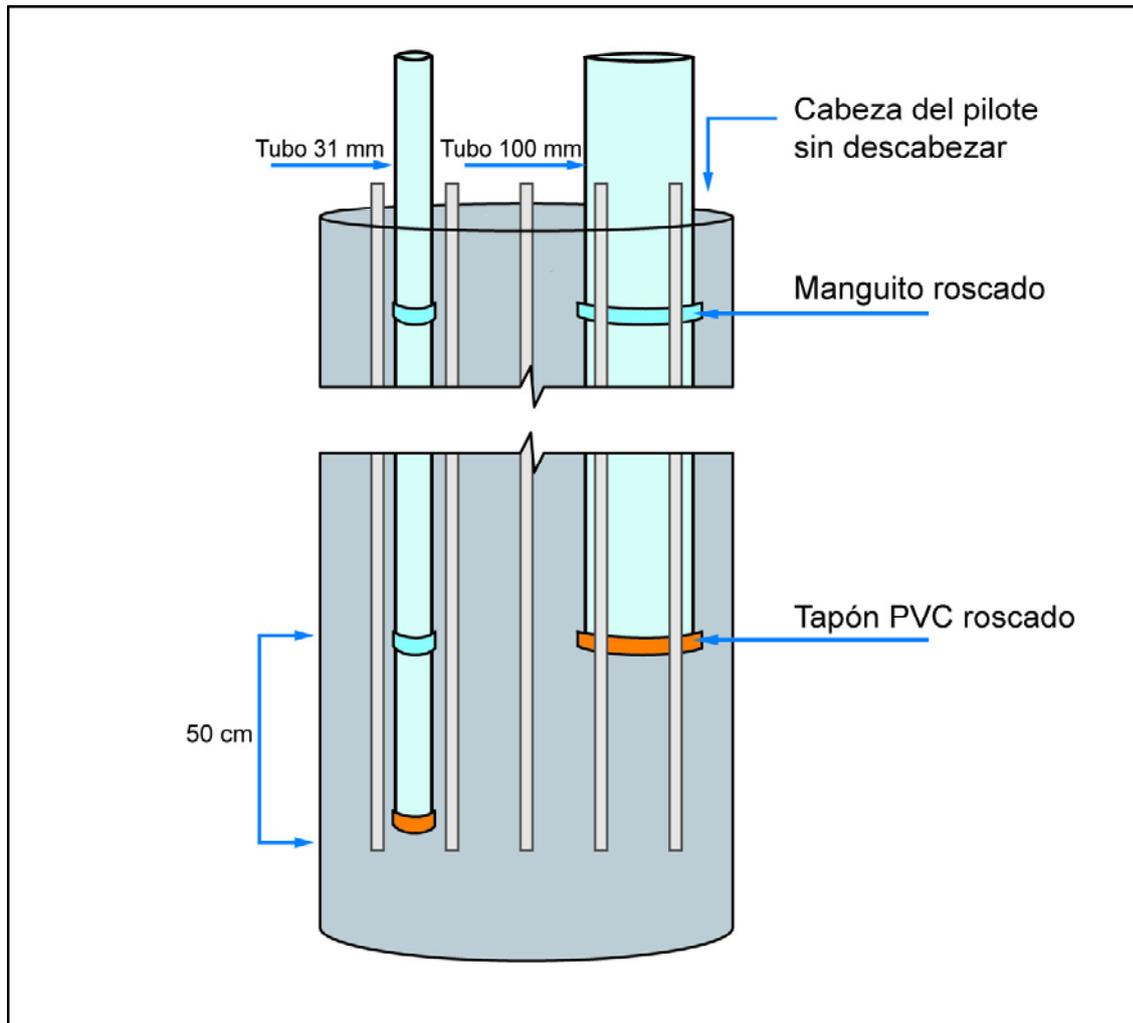


FIG. 2.22.- INSTALACIÓN DE TUBO DE MAYOR DIÁMETRO EN PILOTE PARA REALIZAR UN SONDEO MECÁNICO EN PUNTA

Esto puede ser adecuado si el estado de la punta del pilote es importante para investigar el comportamiento de la cimentación, ya que a través de este tubo se puede realizar posteriormente un sondeo mecánico y obtener un testigo del contacto entre el pilote y el terreno de cimentación.

El fondo de este tubo para la investigación “a posteriori” también tiene que ser estanco y habrá que instalar en el fondo, por ejemplo, tapones de PVC, ya que permiten conservar la profundidad máxima de auscultación. No conviene usar cuñas de madera, trapos o tapones de mortero, por que enmascaran la profundidad y son más difíciles de romper para realizar el testigo, inspeccionar con otras sondas, etc y pueden no ser estancos.



FIG. 2.23.- MALA INSTALACIÓN DE LOS TUBOS EN PUNTA

Para realizar una buena auscultación de la punta de los pilotes o pantallas no sólo se debe pensar “a priori” que se va a instalar un tubo para realizar un sondeo de análisis del contacto, el resto de tubos deben llegar a la base de la armadura. En la figura 2.23 se observa una mala instalación de tubos ya que no llegan al fondo de la armadura.

Cuando se realizan sondeos de investigación, sobre tubos previamente instalados, ya se dispone de la auscultación sónica en el resto de los tubos y hasta la profundidad completa. La información obtenida en los registros sónicos se debe explotar al máximo antes de realizar los sondeos en punta.

La interpretación adecuada de un buen registro sónico en detalle de la punta de un pilote o una pantalla puede proporcionar más información sobre el estado del hormigón en punta que un sondeo con recuperación de testigo, en especial cuando el material no es coherente y el propio agua y rotación del sondeo puede enmascarar las condiciones reales de punta. Así mismo es importante realizar un análisis escrupuloso de las longitudes de auscultación como se muestra en la figura 2.24.

Es muy importante, sobre todo cuando en los pilotes se suponga que pueden tener heterogeneidades, disponer de las cotas de boca de los tubos, cabeza del pilote, fondo de perforación, etc..., para poder analizar su estado.

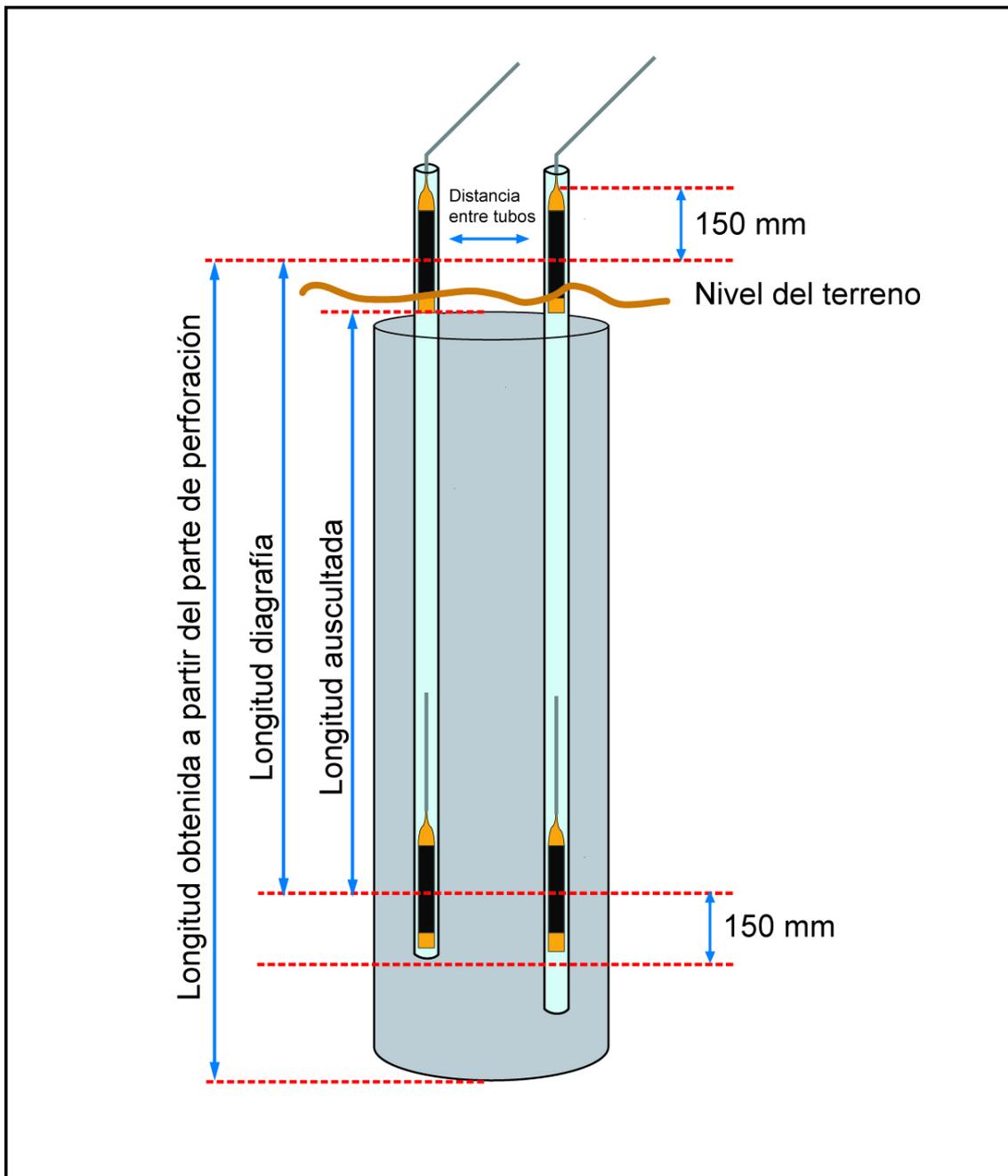


FIG. 2.24.- LONGITUDES DE AUSCULTACIÓN



En el informe deberá de quedar constancia clara de la orientación en planta y localización de los tubos de auscultación en el pilote, la identificación de estos, la numeración que se ha utilizado y las distancias entre tubos.

Esta identificación de tubos tiene que ser clara, así como la identificación del pilote que los contiene.

Hasta aquí se han descrito los equipos de toma de datos, la instrumentación necesaria previa al ensayo y cómo se realizan los ensayos con las dos sondas dentro de los tubos que se izan simultáneamente. En los puntos siguientes se describen el tratamiento de señal, los ensayos especiales para definir con precisión las heterogeneidades observadas y el análisis de defectos.

## **2.6. Características de los equipos de ensayo**

La normativa que existe de estos ensayos indica, en general, que se deben exigir determinados niveles de precisión tanto en la medida de profundidad como en la medida del tiempo de llegada de la señal. En algunas de las normas se hacen ciertas consideraciones en referencia a la precisión, en especial en la medida del tiempo de llegada.

Una norma de este ensayo debería exigir al menos unos mínimos en el cálculo del tiempo de llegada, pero lo que es más importante para el cliente final es obtener una valoración en incertidumbre con un  $\pm$  % de la posición de una determinada anomalía. El análisis del tiempo de llegada sin embargo debe ser más una valoración de estado del hormigonado que de análisis de una magnitud física.

Para la verificación y calibración de los equipos en normas europeas se utilizan referencias a patrones metrológicos superiores. Estos son equipos/ensayos que indican la homogeneidad global o no del elemento a los que es necesario realizar verificaciones y/o calibraciones para poder evaluar la incertidumbre. Sin embargo al ser equipos de medida de la homogeneidad no parece metrológicamente necesario realizar calibraciones del tipo ENAC o similar de los osciloscopios u otros componentes. Sería adecuado que las empresas que se dedican a estos con-



**CEDEX**

troles cuenten con un sistema de calidad y procedimientos de verificación, por ejemplo, con probetas de hormigón o que realizaran ensayos de contraste con otros equipos.

La norma ASTM indica, además de algunas consideraciones de calibración, que los resultados del ensayo dependen de la competencia del personal que los realiza en primera instancia y también de las características del equipo que se utiliza, por lo que habrá que valorar la formación de los ingenieros responsables del análisis y de las prestaciones y el buen mantenimiento y verificación del equipo que se emplea.

En Francia, la normativa indica que se debe registrar la variación en amplitud, además del tiempo de llegada. En general los equipos digitales registran esta variación al tener un registro y almacenamiento de la señal en cada profundidad como se ha mostrado en el punto anterior, sin embargo la amplitud debe de utilizarse como información complementaria al tiempo de llegada y no parece lógico rechazar equipos que no realicen este análisis.

La norma ASTM indica que si el registrador es digital, el convertidor A/D debe tener resolución de 12 bits mínimo en amplitud y un muestreo en frecuencia de 250 kHz. Es evidente que como los equipos registran variaciones en el tiempo de llegada de la señal, deben de ser lo suficientemente precisos para poder registrar estas variaciones y permitir separar zonas de diferentes comportamientos.

Los equipos actuales que se comercializan son de características muy superiores a las que exigen las normas a nivel internacional en general y como tal no producen errores metrológicos importantes.

## **2.7. Toma de datos y análisis. Diagrafías**

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 que producen trenes de ondas a intervalos verticales, comúnmente cada 10 a 50 mm. La unidad de control registra cada una de las señales (figura 2.25) 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.

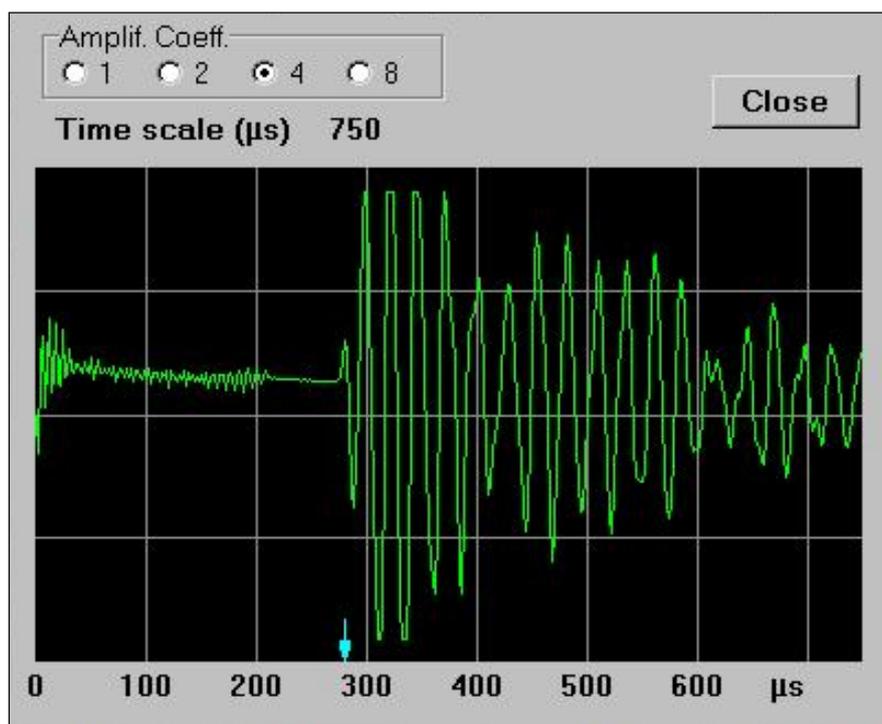


FIG. 2.25.- SEÑAL SÓNICA REGISTRADA ENTRE 2 TUBOS DE AUSCULTACIÓN

Las señales registradas se tratan con un postproceso para generar una diagrafía como superposición de las distintas llegadas a diferentes profundidades (figura 2.26). 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 el caso de modular la señal, al unir los registros a las distintas profundidades se produce una diagrafía como la que se muestra.

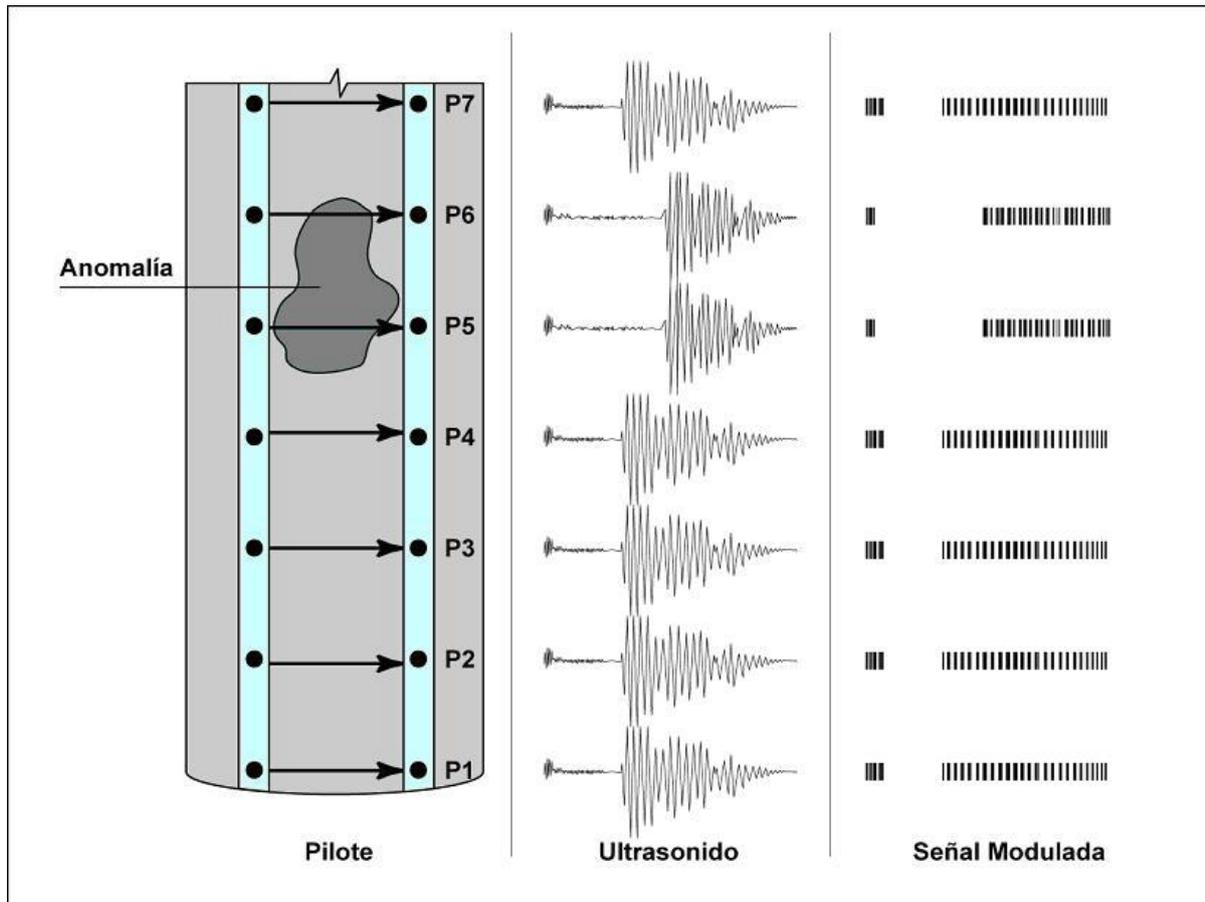


FIG. 2.26.- TRATAMIENTO DE LA SEÑAL SÓNICA PARA GENERAR UNA DIAGRAFIA MODULADA

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.

A continuación se observa un registro continuo en un pilote sin defectos (figura 2.27) y un registro con un pilote defectuoso a media altura del fuste (figura 2.28).

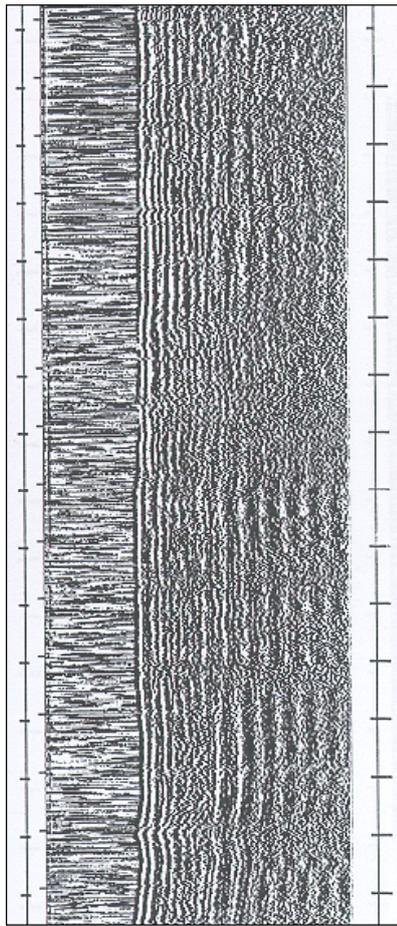


FIG. 2.27.- DIAGRAFÍA  
SIN DEFECTO

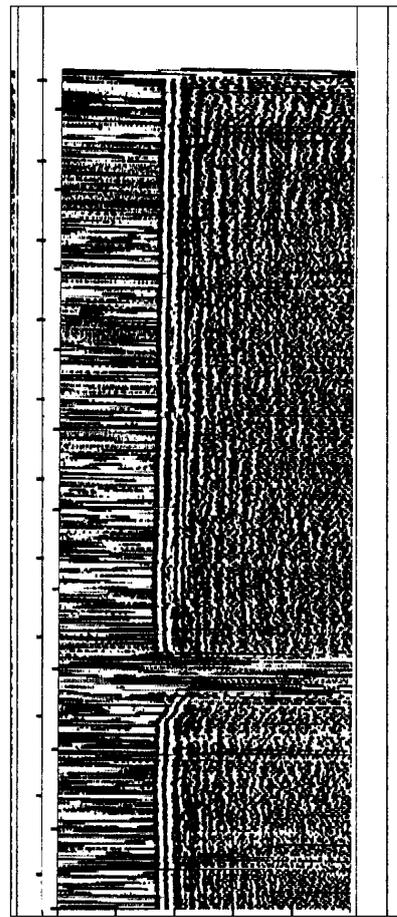


FIG. 2.28.- DIAGRAFÍA  
CON DEFECTO

Como diagrafía o registro sónico en esta técnica de Transparencia Sónica, se debe entender desde los registros del tiempo de llegada de la primera onda con un registrador de plumilla, hasta el tratamiento tridimensional de los sucesivos trenes de onda en profundidad aunque por supuesto el proceso de cálculo será más sofisticado en este último caso.

Es decir, con la señal original se pueden realizar varios análisis pero hay que entender que éstos son siempre tratamientos de señal que pueden generar resultados más o menos visuales, y que hay que partir de datos originales de calidad para poder realizar estos procesos que sencillamente ayudan a la interpretación.

1. Registro en Profundidad de la primera llegada. Este es un registro sencillo que realizaban los equipos registradores de plumilla en el que tan sólo se representa-



CEDEX

ba el tiempo de llegada del primer frente de ondas que sobrepasaba un umbral. Tiene el inconveniente de que no se dispone de todo el tren de ondas.

2. Diagrafia modulada. Es el registro más común utilizado para la interpretación, en el que la onda registrada a cada profundidad se modula otorgando un color negro a las amplitudes positivas y blanco a las negativas como se ha mostrado en la figura 2.26. Este proceso lo realizan la mayor parte de equipos, almacenen o no la señal original (figuras 2.29 y 2.30).
3. Tratamientos especiales de señal. Los equipos que digitalizan y almacenan la señal permiten realizar algunos tratamientos especiales que asisten a la interpretación como son:
  - Valoración de la amplitud de la primera llegada otorgando porcentajes. En este caso se hace un análisis de amplitud (energía) que permite valorar amortiguamientos de la señal registrada. En las figuras 2.29, 2.31 y 2.32 se muestran la valoración de la amplitud (energía) con distintas representaciones, pero la base de interpretación fundamental para considerar la presencia o no de anomalías debe ser el tiempo de llegada. La Amplitud-Energía debe considerarse para completar la información del tiempo de llegada ya que permite determinar la primera llegada en condiciones de amortiguamiento.

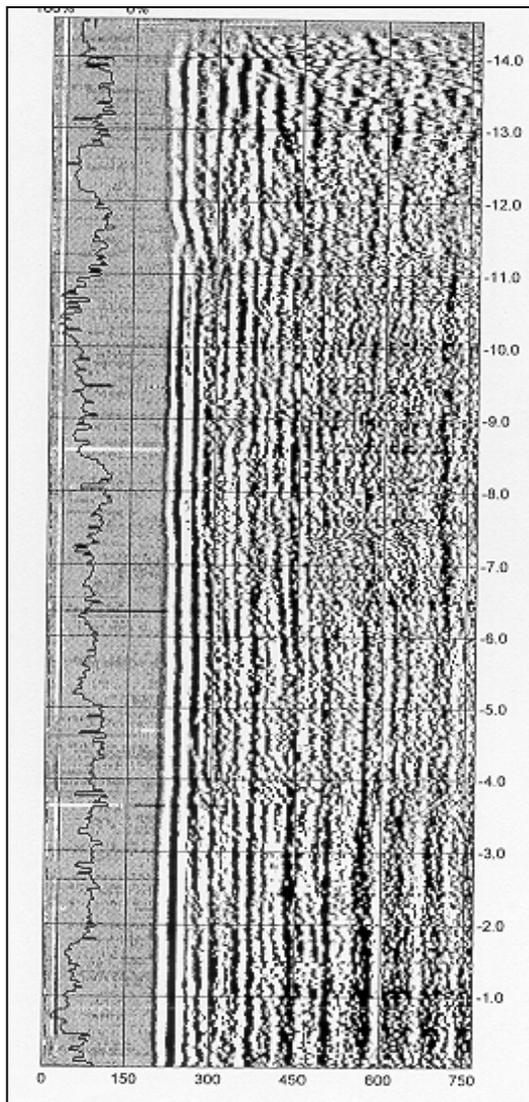


FIG. 2.29.- DIAGRAFIA DIGITALIZADA CON ALMACENAMIENTO DE SEÑAL Y CON ANÁLISIS DE AMPLITUD (ENERGIA)

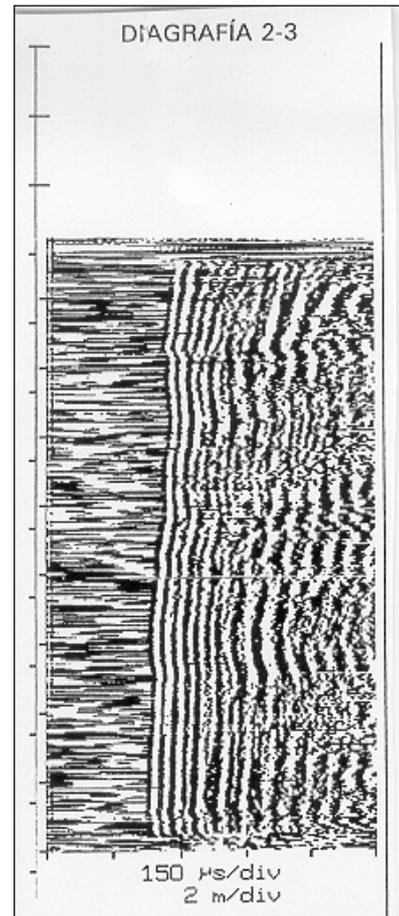


FIG. 2.30.- DIAGRAFÍA IMPRESA SIN ALMACENAMIENTO DE SEÑAL



CEDEX

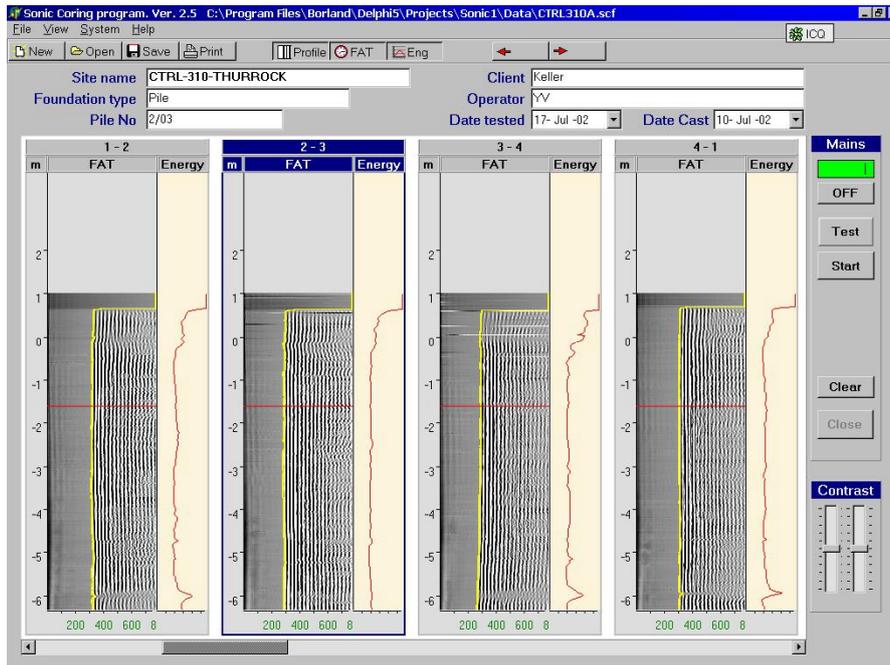


FIG. 2.31.- DIAGRAFÍAS REPRESENTADAS MODULADAS CON LA PRIMERA LLEGADA Y LA AMPLITUD (ENERGÍA)

Representaciones tridimensionales de la diagrafía modulada como se muestra en la figura 2.33 y siguientes e incluso de varios tubos a la vez otorgando colores a los tiempos de llegada como se observa en las figuras 2.34 y 2.35.

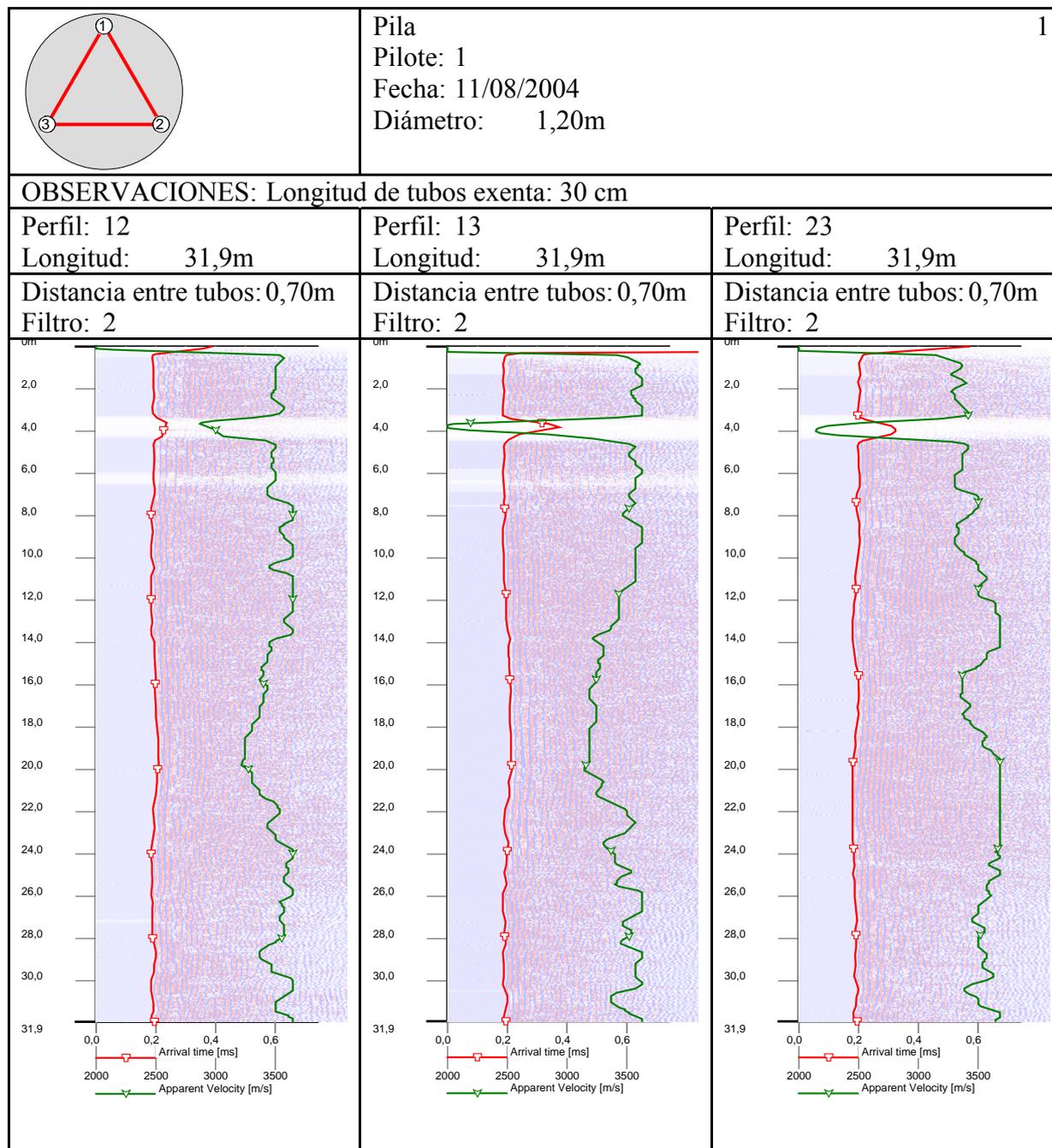


FIG. 2.32.- DIAGRAFÍAS REPRESENTADAS MODULADAS CON LA PRIMERA LLEGADA Y LA VELOCIDAD APARENTE

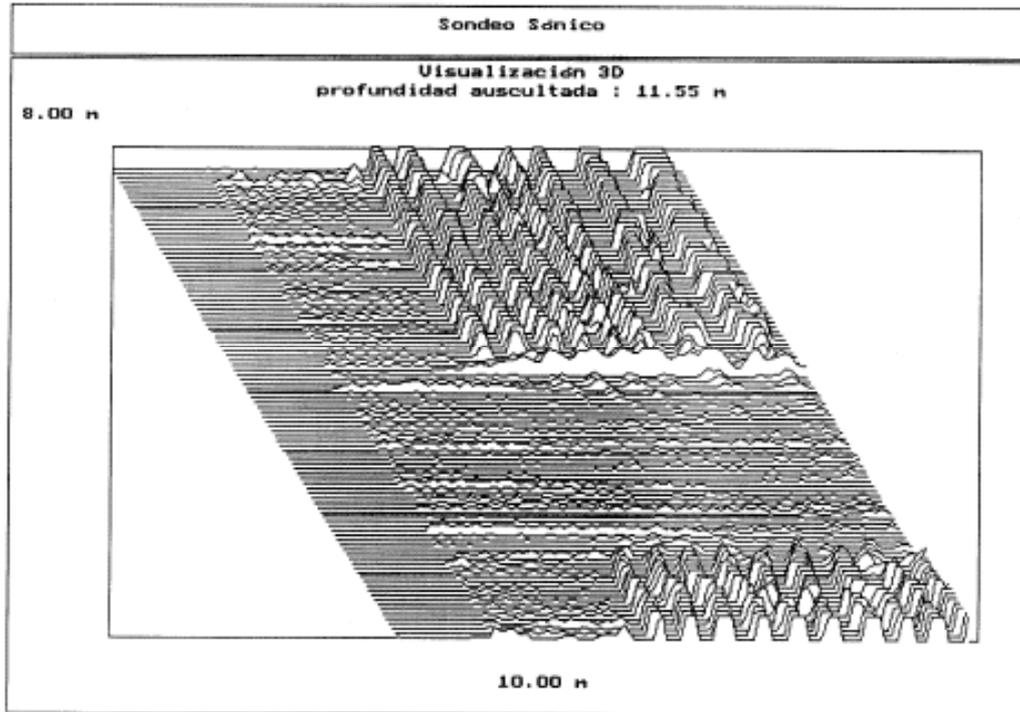


FIG. 2.33 VISUALIZACIÓN 3D DE UNA DIAGRAFÍA EN LA QUE SE REFLEJA LA VARIACIÓN DE AMPLITUD DE LA SEÑAL

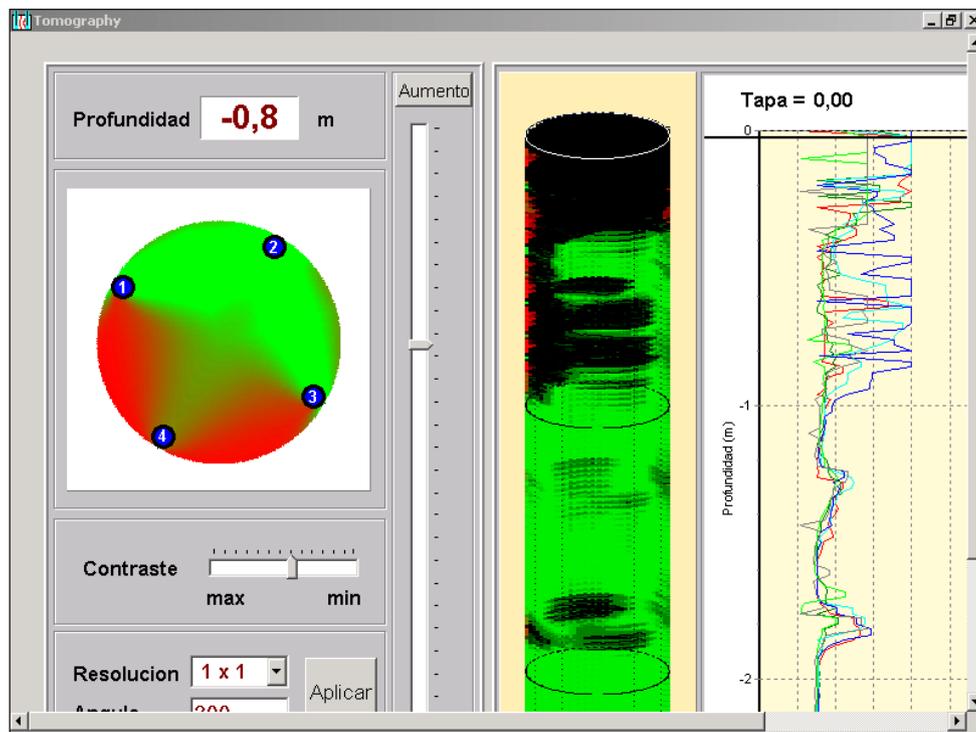


FIG. 2.34.- TRATAMIENTO TRIDIMENSIONAL DE TIEMPOS DE LLEGADA

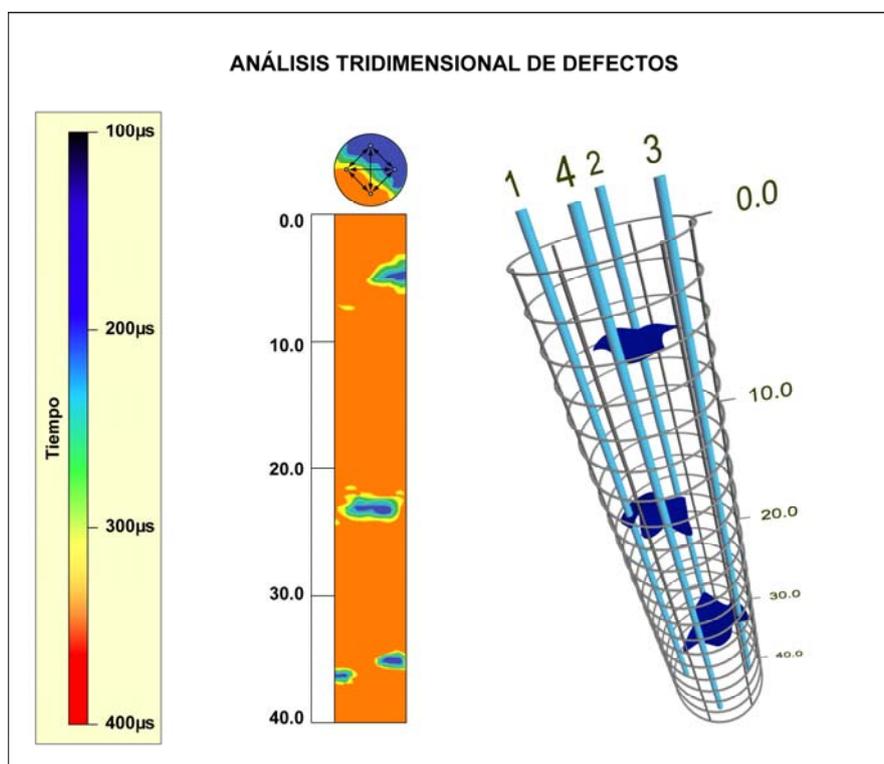


FIG. 2.35.- ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL DE DEFECTOS EN BASE A LOS TIEMPOS DE LLEGADA

Es importante insistir en que estas técnicas son sencillamente tratamientos de señal sin existir diferencia en las características de los sondeos o principios del método.

Tanto en Francia como en Inglaterra, se indica que variaciones “rápidas” del tiempo de llegada mayores del 15 o 20 % deben ser investigadas realizando posteriormente ensayos complementarios. En primera instancia si se observan estas variaciones se deben efectuar ensayos con el máximo muestreo a máxima potencia y registrando la variación de amplitud. En el caso de las pantallas de bataches o de pilotes, que además tengan exigencias de impermeabilización y ya que se pueden reparar los defectos aunque sean pequeños al realizar el vaciado, es conveniente analizar variaciones por debajo de estos porcentajes, e incluso ensayar juntas entre distintos bataches.



**CEDEX**

Para los pilotes o pantallas, siempre que se observen heterogeneidades en varios pares de tubos a idénticas profundidades, por pequeñas que estas sean en espesor y aunque el retraso no llegue a alcanzar valores del 15 o 20% de retraso, se deben de barrer los elementos con sondas en distintas posiciones con el fin de descartar defectos de integridad que afecten significativamente al elemento.

Hay otros aspectos que afectan significativamente a la medida y en los que es necesario insistir para realizar los ensayos de la forma más correcta como son:

- Las sondas en el interior de los tubos no deben moverse lateralmente por lo que si es necesario se deberá utilizar un centrador para que permanezcan bien posicionadas en todo el recorrido. Realmente aunque este es un tema que refleja toda la bibliografía, la experiencia muestra que cuando se ensayan tubos de 100 mm con sondas de 25 mm sin centrador, el peso propio de la sonda que siempre va lastrada y la colocación lateral del torno generador de impulsos hace que ésta se mantenga pegada a la pared del tubo, por lo que el movimiento de vaivén de las ondas no es significativo en el registro.
- Las sondas deben mantenerse en la misma profundidad a lo largo de todo el recorrido. En general, excepto algunos tornos que son muy poco comunes y están motorizados, los equipos tienen sistemas de subida de las sondas manuales. Habrá que hacer un esfuerzo en pilotes largos para remontar las sondas adecuadamente a nivel. En algunas normas se marca incluso la velocidad de ascensión de las sondas pero no parece necesario estandarizar este aspecto.

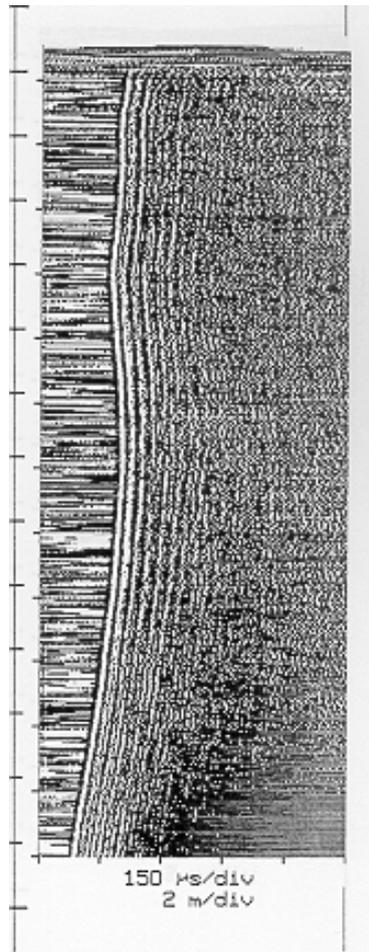


FIG. 2.36.- RETRASOS EN LA DIAGRAFÍA POR INCORRECTA INSTALACIÓN DE LOS TUBOS

- En ocasiones los tubos no mantienen las distancias en toda la profundidad o se sueltan rotando (figura 2.36). Estas variaciones en distancia pueden producir variaciones lentas o suaves en el tiempo de llegada. Sin embargo el personal responsable de los ensayos al observar la diagrafía puede discernir con facilidad que se trata de una separación de tubos y no de una anomalía. Generalmente este tipo de desviaciones en tubos no provocan errores en la interpretación en personal cualificado para realizar este tipo de ensayos.

La edad del hormigón para realizar diagrafías que no presenten amortiguación conviene que sea al menos de 5-7 días. En España respetar estas fechas no suele producir retrasos en la producción ni afectan al plan de obra. En el caso de la norma francesa se recomienda 7 días, así



---

**CEDEX**

como en la norma ASTM, que también indica un límite de 7 días o cuando la resistencia a compresión sea el 75 % de la de proyecto.

## **2.8. Disposiciones especiales de las sondas**

### **2.8.1. Generalidades**

El ensayo de Transparencia Sónica se realiza normalmente con la sonda emisora y receptora a la misma profundidad en el pilote (figura 2.11). Cuando en el ensayo normal se detectan heterogeneidades o anomalías que se quieren delimitar más claramente entonces se suelen cambiar las sondas de posición (figura 2.37).

Las sondas se pueden desfasar también o cambiar en profundidad cuando se sospecha que se han podido producir defectos en los elementos y no se han observado en primera instancia con el ensayo estándar con las sondas a la misma profundidad.

Es conveniente efectuar diagrafías especiales, con sondas a distintos niveles, cuando se esperan heterogeneidades perpendiculares al eje de los pilotes o se quiere investigar una zona que se ha considerado anómala por roturas en el descabezado, etc. Se debe tener en cuenta que, el que las sondas no se encuentren a la misma profundidad desde la cabeza del pilote, puede provocar que la señal sea muy amortiguada y más difícil de interpretar.

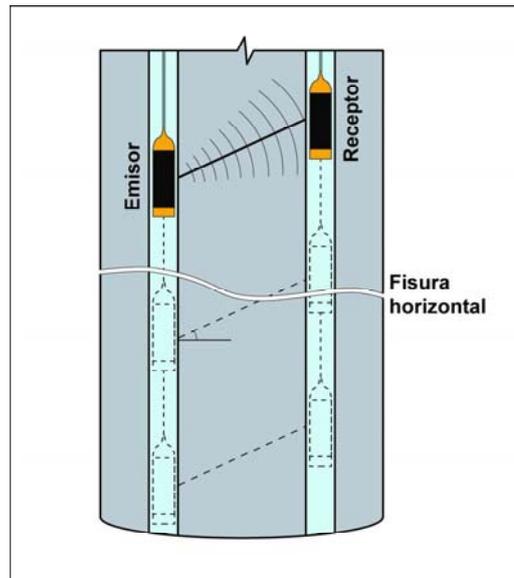


FIG. 2.37.- TRANSPARENCIA SÓNICA CON SONDAS A DISTINTAS PROFUNDIDADES

Para la definición de heterogeneidades se pueden realizar ensayos manteniendo una de las sondas quietas y desplazando la otra para realizar diagrafas en abanico. Las diagrafas en abanico permiten evaluar la extensión horizontal de una anomalía (figura 2.38).

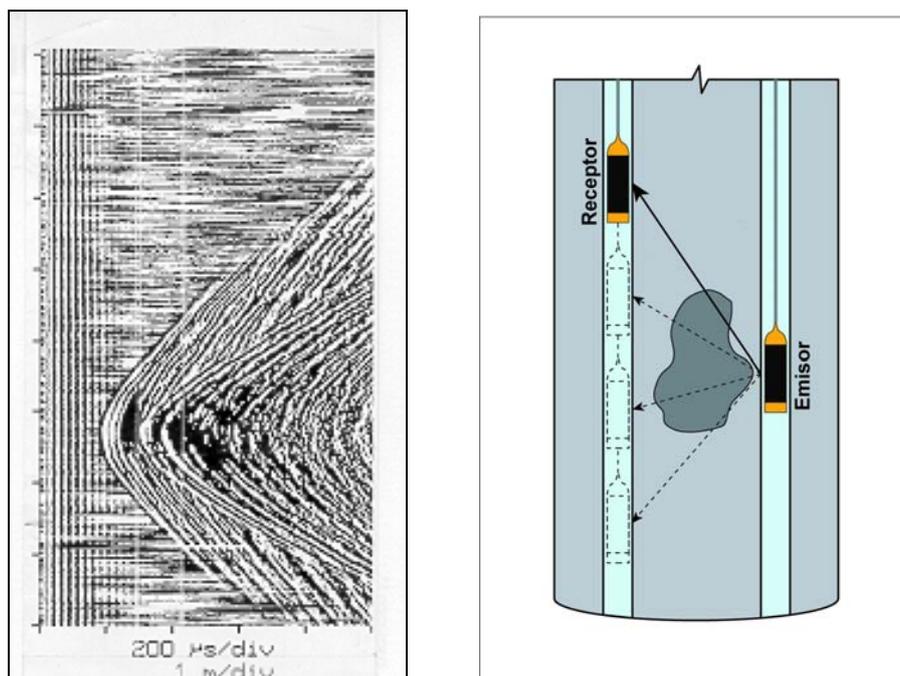


FIG. 2.38.- DIAGRAFÍA EN ABANICO



**CEDEX**

En aquellos casos en que se realizan sondeos mecánicos para controlar el contacto pilote-suelo, y si es sólo un tubo el que se perfora para inspeccionar la punta, es muy interesante realizar diagrfias en abanico con una sonda justo en el fondo del tubo de auscultación y la otra moviéndose en el sondeo. Esta disposición permitirá ver en detalle el contacto pilote-terreno.

### **2.8.2. Diagrafias en un solo tubo**

Como caso muy especial se pueden realizar ensayos de Transparencia Sónica en un solo tubo o sondeo en pilotes o pantallas. Esta técnica denominada normalmente como “Single-hole sonic logging” y muy utilizada por ejemplo en la geofísica en sondeos, es de mucho menor aplicación en el control de pilotes. Sólo se usa como solución extrema, cuando no se dispone o se han obstruido los tubos instalados en el pilote, o cuando se ha realizado un sondeo de investigación para asegurarse de la presencia de anomalías detectadas con la técnica clásica. En este caso, la emisión y recepción se realizan en el mismo tubo o sondeo con una sola sonda, que contiene el receptor y el emisor de ultrasonidos separados por un aislante acústico. En el caso de que se usen las sondas emisora y receptora individuales del equipo de Transparencia Sónica, se separan la una de la otra una distancia conocida. Se han obtenido buenos resultados con distancias de 1 m entre sondas.

Se debe registrar la velocidad de la onda por las paredes de la perforación entre emisor y receptor. Esto permite analizar las características del hormigón que constituye el pilote si se efectúa con el muestreo necesario.

En la diagrfia de la figura 2.39 se muestra un ejemplo de resultado obtenido con esta disposición.

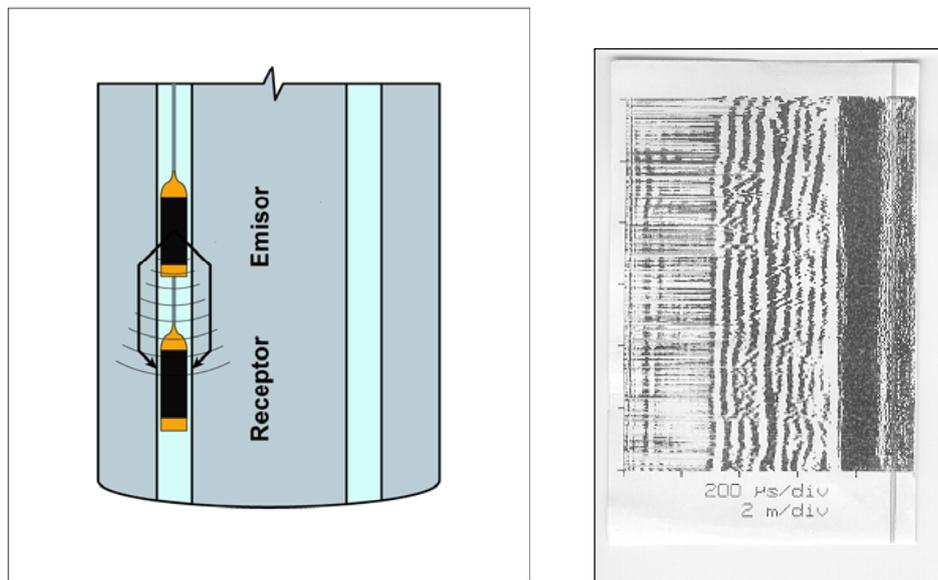


FIG. 2.39.- DIAGRAFÍA REALIZADA EN UN SOLO SONDEO

La interpretación que se realiza es similar a la que se efectúa cuando se utilizan varios tubos, pero los fenómenos de amortiguamiento de la señal son más acusados. Se debe prestar atención a la medida de la profundidad auscultada que siempre será menor a la longitud del pilote al tener que restar la distancia que separa las sondas.

Un registro continuo de tiempos de llegada por las paredes de una perforación o sondeo, a pesar de las limitaciones que tiene, confirma la existencia o no de defectos. Complementa también la información obtenida de los sondeos con extracción de testigo de hormigón o a destroza, que se hayan realizado previos a las inyecciones de reparación.

El sondeo, al igual que en la técnica clásica, debe estar relleno de agua. El anillo reconocido dentro de las paredes y alrededor del tubo que se puede esperar, según la bibliografía, varía entre pocos milímetros y 100 mm. Con tubos de PVC o de ABS inclinométricos, los resultados han sido muy interesantes, pero sin embargo, el uso no es muy adecuado con tubos metálicos al propagarse la onda sónica por la pared de éstos.



### 2.8.3. Diagramas de detalle en punta

Para evaluar las anomalías detectadas en la punta de los pilotes, cuando se registran heterogeneidades con la pendiente típica de retrasos de tiempo en las diagramas (figura 2.40), Stain y Williams proponen una serie de ecuaciones que se describen a continuación, en base al gráfico de recorridos que se produce en la onda registrada.

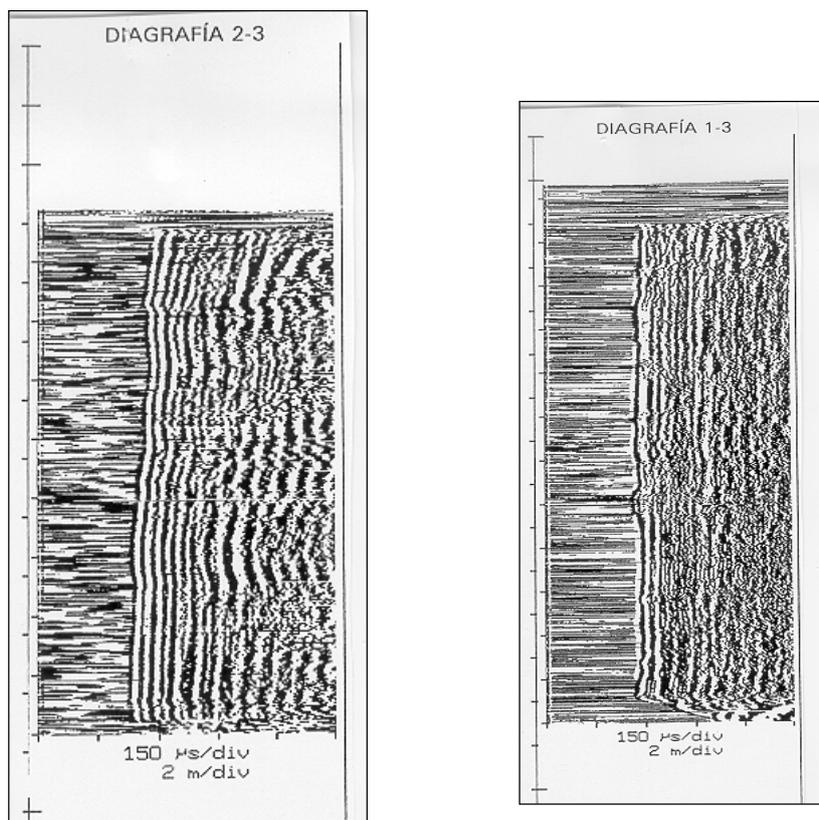


FIG. 2.40.- DIAGRAFÍAS CON DEFECTOS PROGRESIVOS TÍPICOS EN PUNTA

En los casos en que se detecten este tipo de anomalías, las ecuaciones pueden ayudar a valorar la zona afectada. El punto de partida para esta evaluación debe de ser una diagrama de la zona de punta a máxima resolución en la escala de profundidad con máxima amplitud de emisión y recepción de señal.

Si la anomalía en punta afecta a los dos tubos de ensayo que se registran, la pendiente de la primera llegada en la diagrama,  $S$ , (en el gráfico profundidad – tiempo de llegada), según Stain y Williams, sería la siguiente:

$$S = 0,5 * c_t$$

, siendo  $c_t$  la velocidad de propagación en el tubo

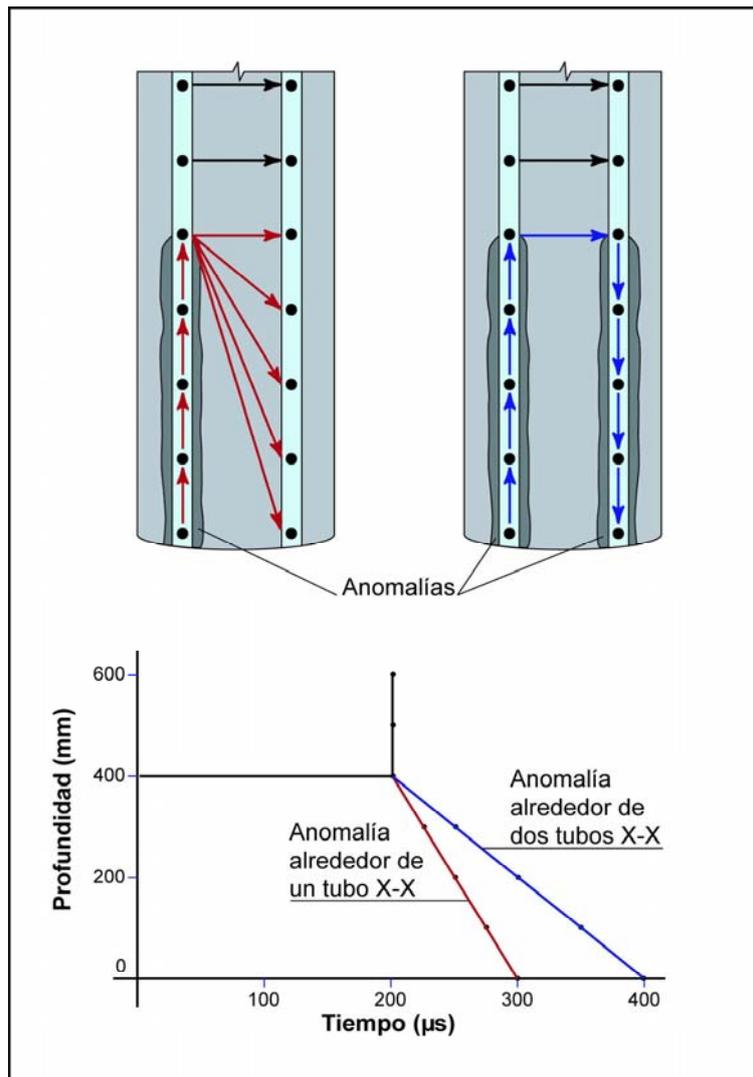


FIG. 2.41.- ESQUEMA DE PROPAGACIÓN EN PUNTA DE PILOTES CON ANOMALÍAS

Como se observa en la parte derecha de la figura 2.41, la onda emitida remontaría el pilote por el agua del tubo hasta encontrar el hormigón sano y descendería por el tubo que tiene la sonda receptora. Así hasta que las dos sondas estén en el hormigón sano y la diagrafía sea paralela. La pendiente de la recta será independiente de la distancia entre tubos de la diagrafía.



Sin embargo cuando el defecto afecta sólo a un tubo de los dos, estos autores proponen que el tiempo de llegada es:

$$t = \frac{l}{c_t} + \frac{\sqrt{(d^2 + l^2)}}{c_c}$$

Donde:  $l$  es la profundidad de la sonda bajo el inicio de la heterogeneidad  
 $d$  la separación entre tubos  
 $c_t$  la velocidad de propagación en el tubo  
 $c_c$  la velocidad de propagación en el hormigón sano

La propagación de la señal en la punta es como se muestra en la parte izquierda de la figura 2.41.

De esta forma se observa que las anomalías en 2 tubos tendrán mayor pendiente que si afecta a un solo tubo. Considerando esto, se puede evaluar en qué medida se está afectando a uno o varios tubos.

Es muy importante destacar que para realizar este tipo de análisis se precisa de diagrafas con alta resolución y sin amortiguamientos, por lo que habrá que repetir los detalles en punta con alta resolución en profundidad y con una amplitud suficiente en recepción.

## **2.9. Interpretación de diagrafas. Análisis de integridad**

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 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.

El objeto de este documento, como se ha indicado en el capítulo 1, es asistir a todos los implicados en el control de cimentaciones. El propósito final es analizar cómo se lleva a cabo una buena interpretación de resultados, sin olvidar que la diagrafía registrada permite un análisis de integridad del pilote en profundidad de la cual hay que dar una valoración.

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.



CEDEX

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.

A continuación se describe un trabajo de Stain y Williams en el que han realizado ensayos de Transparencia Sónica sobre muestras de laboratorio, obteniendo resultados muy esclarecedores. Se ha creído adecuado incluir los resultados completos en este texto con el consentimiento de los autores.

El trabajo analiza los efectos de varias anomalías o heterogeneidades, provocadas intencionalmente sobre muestras de hormigón en laboratorio. En las muestras se obtuvieron valores de rotura a compresión de 33 MPa a 28 días.

Las principales conclusiones que obtuvieron los autores de estos ensayos son las que se detallan a continuación:

- Un hormigón con resistencia a los 28 días de 20 MPa no provoca un retraso importante en el tiempo de llegada, por lo que no puede detectarse con la Transparencia Sónica.
- Una lechada con resistencia a los 28 días de 14 MPa produce un retraso de un 25 %
- La velocidad de propagación a través de los huecos del hormigón que estén llenos de agua se puede asimilar a los 1500 m/s de velocidad de propagación en el agua.
- El efecto que provocan las disgregaciones en el tiempo de llegada depende de la saturación del material. Si el árido de la zona disgregada está seco, la atenuación de la señal es muy significativa. Si la velocidad del medio es menor que la del agua que rellena los poros, la velocidad de propagación será similar a la del agua.



- Las inclusiones de arenas o gravas con un alto contenido de finos producen una atenuación muy alta de la señal.

En relación a las inclusiones de bentonita, los autores indican que atenúan rápidamente la señal, de tal forma que para espesores de lodo mayores de 112 mm la señal no se registra. Por otro lado, afirman que depósitos de bentonita en el exterior del tubo no afectan a los resultados incluso cuando éstos alcanzan espesores de hasta 5 mm. Asimismo, un hormigón contaminado en un 30 % por bentonita atenúa las altas frecuencias de la señal y causa un importante incremento en el tiempo de llegada de la misma.

Los autores aportan como contradicción, sobre lo que comúnmente se ha comentado, que los despegues en los tubos tampoco causan un cambio significativo en la señal, y que los resultados que se obtienen con tubos de plástico son similares a los obtenidos con tubos de acero. Esta conclusión es importante ya que siempre se ha escrito sobre los problemas de despegues en los tubos de PVC y muestra que las limitaciones de los tubos de PVC son tan solo por no ser capaces de soportar la presión del hormigón obstruyéndose. En cualquier caso con los tubos de acero se consigue un mejor contacto que limita el riesgo de efectuar malas interpretaciones.

Con lo anteriormente expuesto y aunque la interpretación de las diagramas pueda parecer evidente, hay algunos casos en que no se producen retrasos en el tiempo de la señal sino únicamente amortiguaciones por despegues de tubos que pueden enmascarar la recepción. Algunos autores consideran que existe heterogeneidad cuando el retraso en el tiempo de la señal supera el 15 o el 20 % pero este umbral debería modificarse tomando en consideración el número de pares que registran la anomalía y si corresponden todos a un solo tubo de origen (posible mal contacto).

A modo de ejemplo, CALTRANS plantea las siguientes pautas para la interpretación de los ensayos de transparencia sónica, basadas en el incremento del tiempo de llegada y los efectos sobre la señal:



CEDEX

- Considera una valoración aceptable cuando el incremento del tiempo de llegada,  $\Delta t$ , es inferior al 10% y no hay efectos sobre la señal; anomalías pequeñas cuando  $\Delta t$  está comprendido entre el 10% y el 20%, con distorsión escasa y pequeña disminución de la amplitud; y anomalías significativas cuando  $\Delta t$  es superior al 20% y se produce una distorsión severa de la señal con una reducción significativa de la amplitud.
- La ausencia de señal se interpreta como un defecto severo con una muy probable presencia de intrusión de suelo o despegue del tubo en un tramo sobre el nivel freático. Por último, CALTRANS supone que una velocidad próxima a 1500m/s sería indicativa de que la señal se transmite por el agua.

En las figuras 2.42-a y 2.42-b se muestran diagrafías de una pantalla continua con ampliación y visualización en 3 dimensiones de una zona en la que se detectó un defecto. Entre 5,50 m y 7,70 m de profundidad se aprecia el aumento del tiempo de propagación y la total pérdida de la señal. Este módulo estaba instrumentado con 7 tubos colocados al tresbolillo. Se realizaron un total de 11 diagrafías en las cuales se detectaron varias anomalías de consideración. Se recomendó investigar cuidadosamente las zonas afectadas a medida que se realizaba la excavación.

Tras la excavación se descubrió el intradós del módulo apareciendo una gran discontinuidad en el hormigón como se puede observar en la figura 2.42-c. En ella se ven claramente los tubos sónicos.

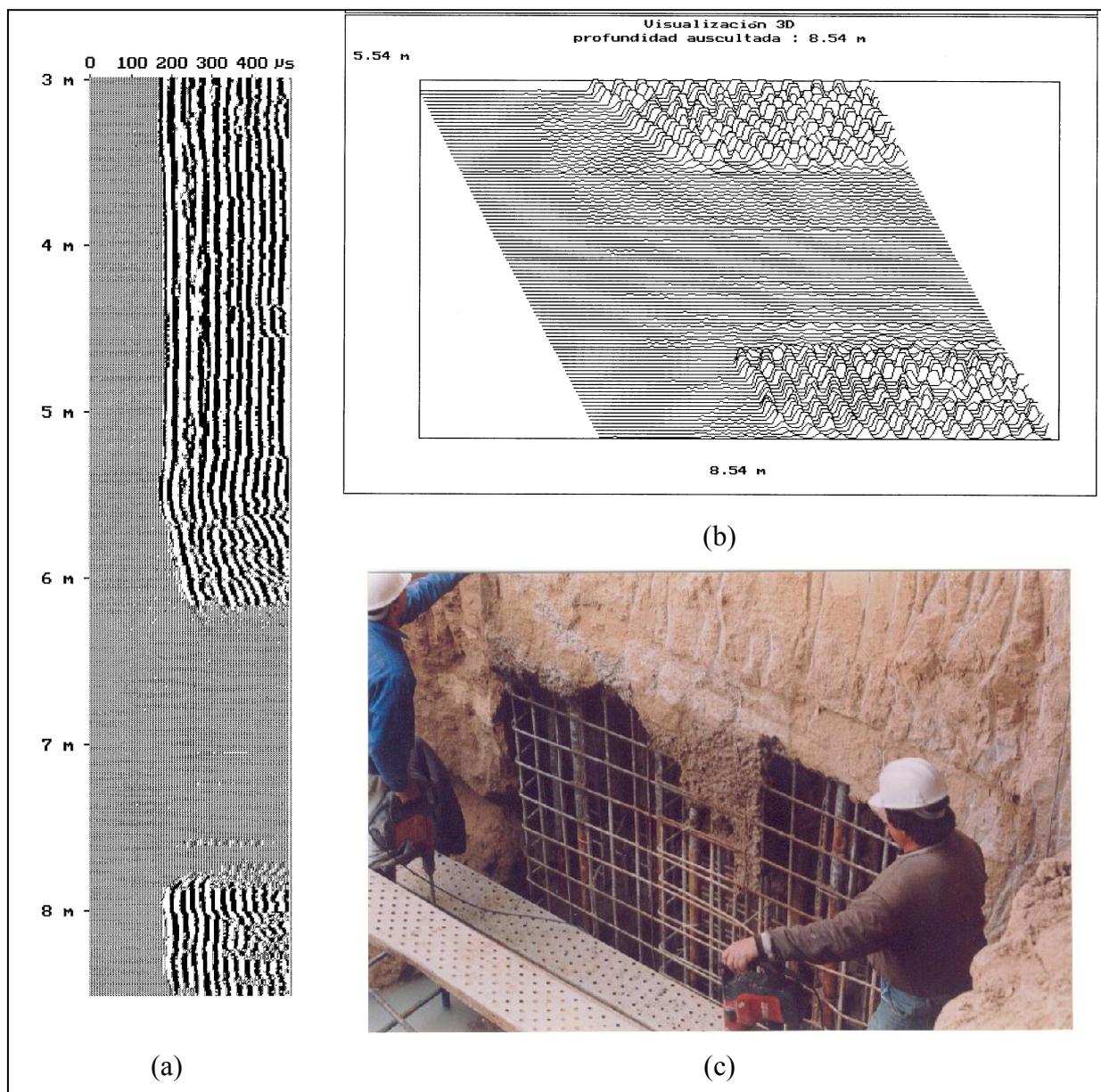


FIG. 2.42.- DIAGRAFÍA DE PANTALLA CONTINUA CON DEFECTO ENTRE 5,5 Y 7,7m DE PROFUNDIDAD

En obras en las que se requiera una estanqueidad del recinto, por ejemplo en pantallas con juntas realizadas con hidrofresa o en elementos que trabajen a flexión, estos umbrales deben de ser más estrictos y el análisis se hará con máxima resolución y amplitud, como se ha indicado en el apartado 2.6. Características de los equipos de ensayo.

Siempre se han asociado los problemas de amortiguamiento de la señal a despegues o disgregaciones en el hormigón, mientras que el hormigón pobre o deslavado de mortero provocaba



CEDEX

un retraso en el tiempo de llegada pero con poca atenuación. Esto choca con las conclusiones de Stain y Williams por lo que habrá que reconsiderar con datos de hormigonado, geotécnicos, posteriores investigaciones etc., el análisis que se hace del tiempo de llegada combinado con la amplitud. La información que proporciona la amplitud o energía se ha tratado anteriormente.

Si se detectan anomalías, conviene clasificarlas valorándolas y situándolas adecuadamente para aportar el mayor número de datos al ingeniero responsable que tenga que decidir sobre la aceptabilidad del pilote o los arreglos a efectuar.

## **2.10. Ventajas y limitaciones**

Entre las limitaciones del método de Transparencia Sónica, además de la evidente necesidad de la instrumentación antes del ensayo, se encuentra que la investigación se limita al interior de las armaduras. La auscultación se reduce al área en el que se encuentran los tubos y siempre en el recorrido de la onda sónica.

Así en el caso de instrumentaciones de 3 tubos como se observa en la figura 2.43, pueden quedar sin investigar las zonas centrales. Igualmente no se detectarán heterogeneidades en los bordes del pilote alrededor de las armaduras.

Cuando se produce un incremento de tiempo en la llegada de la señal, el ensayo no permite determinar claramente si éste está provocado por un aumento del espacio recorrido o por una reducción en la velocidad de propagación. En el texto se han descrito análisis de la señal que permiten acotar el problema.

Se deberá tener en cuenta sin embargo, que generalmente las heterogeneidades que se observan no suelen ser puntuales, ni planas, ni afectan exclusivamente al plano de contacto entre el hormigón de la punta y el terreno. Cuando se producen inclusiones o variaciones en la calidad del hormigón, éstas afectan a varios trayectos y cuando no se ha desarenado apropiadamente o la punta del pilote o pantalla no está bien ejecutada, el espesor es significativo y afecta a varios tubos.

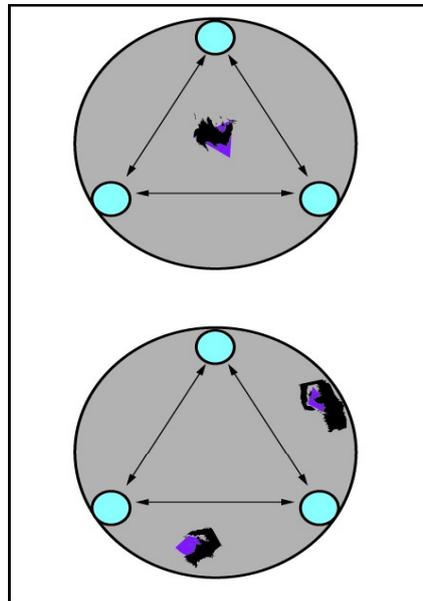


FIG. 2.43.- DEFECTOS NO OBSERVABLES CON UNA INSTRUMENTACIÓN DE 3 TUBOS

La técnica de transparencia sónica no proporciona información sobre la reacción pilote-suelo ni sobre condiciones de empotramiento en punta. Para analizar con detalle el contacto entre la punta y el terreno sería necesario realizar un taladro y efectuar disposiciones en abanico de las sondas.

El método no permite en sí mismo detectar si los retrasos que se producen son debidos a la presencia de coqueras, al deslavado del hormigón, presencia de juntas entre hormigones, a inclusiones de lodo, etc., tan solo detecta que existe un defecto. El método se debe de considerar como una técnica para evaluar la continuidad del pilote y la homogeneidad del hormigón de forma cualitativa, aunque por supuesto, las experiencias que se han descrito anteriormente deben ayudar a valorar el estado de la cimentación.

Como ventaja significativa, la Transparencia Sónica presenta una gran precisión en la medida de profundidades con resoluciones en general del orden de 20 mm. Esta precisión en la detección de defectos no se puede igualar con otros métodos de auscultación. En planta es el único método que, con un número suficiente de tubos, permite situar las irregularidades. También



**CEDEX**

permitiría conocer el estado del hormigón de la punta del pilote si los tubos han sido instalados adecuadamente.

De forma complementaria se obtiene la cota mínima necesaria de descabezado del pilote hasta alcanzar el hormigón sano con mucha precisión. Al contrario que en otros métodos, no está limitado a los pilotes y se puede ensayar pantallas. Tampoco es necesario que los pilotes estén descabezados para realizar el ensayo e incluso se pueden realizar los ensayos una vez realizados los encepados si se han prolongado los tubos por encima de éstos.

El método permite comprobar si un tratamiento de inyección ha sido eficaz para reparar un defecto en el pilote.

La Transparencia Sónica goza de una amplia implantación probablemente porque presenta la apariencia de ser un ensayo fácil de interpretar, pero conviene que los ensayos sean realizados e interpretados por personal especializado con experiencia y criterio, lo que evitará enjuiciamientos erróneos.

## **2.11. Informe de resultados**

El informe de resultado deberá contener los siguientes datos:

### DATOS GENERALES:

- Empresa que realiza el ensayo
- Descripción del equipo y de las sondas
- Nombre de la obra y nº de informe
- Fecha de ensayo
- Nombre y firma de la persona que realiza el ensayo
- Fecha de verificación del equipo



## ELEMENTO A AUSCULTAR Y ENSAYO:

- Identificación del elemento y croquis o localización del pilote o módulo de pantalla
- Tipo de pilote o pantalla
- Diámetro del pilote o geometría de la pantalla
- Cota de la punta y de la cabeza
- Fecha de hormigonado
- Incidencias e información geotécnica que pudiera repercutir en la interpretación de los ensayos
- Observaciones en referencia a si hay tubos obstruidos y profundidad
- Distancia entre tubos y croquis
- Cota de los tubos
- Cota de descabezado
- Longitud que asoma el hormigón del terreno
- Longitud que asoma el tubo por encima del hormigón
- Diámetro de los tubos
- Observaciones (Indicaciones sobre otros ensayos complementarios que fueran necesarios)

## DIAGRAFÍAS

- Escala de tiempo y profundidad
- Localización de posibles anomalías
- Conclusiones



### 3. TÉCNICAS DE ECO E IMPEDANCIA MECÁNICA EN PILOTES

#### 3.1. Introducción

Los ensayos de Eco y de Impedancia Mecánica, que se describen a continuación, se basan en el análisis de la respuesta dinámica provocada por una pequeña fuerza axial, que se aplica en la cabeza del pilote mediante un martillo de mano. Estos ensayos permiten controlar pilotes u otros elementos estructurales siempre que la geometría sea cilíndrica o prismática.



FIG. 3.1.- EQUIPO DE IMPEDANCIA MECÁNICA Y SENSORES DE MEDIDA SOBRE EL PILOTE

En este capítulo se tratan brevemente otras técnicas algo más especiales en las que se genera una onda de compresión por medio de un martillo de mayor peso y se registra en un sondeo próximo (sísmica paralela) o con varios geófonos o acelerómetros a lo largo del fuste del pilote (ultrasismicidad). Éstas son más específicas en estudios de patologías y no para el control de obra nueva. Asimismo se hace una pequeña presentación de casos especiales de auscultación.

El Eco y la Impedancia Mecánica se tratan en puntos separados del capítulo al considerarse como técnicas distintas según se describe en los apartados correspondientes.

Si la respuesta del sensor que mide la vibración generada por el impacto del martillo (geófono o acelerómetro) se analiza en el tiempo, el ensayo en el presente documento se denominará Eco.

Si la respuesta del sensor (geófono o acelerómetro) se analiza en frecuencia, pero además se registra la fuerza (martillo instrumentado con un sensor de fuerza) y se obtiene la curva de movilidad como representación de la velocidad sobre la fuerza registrada en frecuencia, se considerará Impedancia Mecánica.

Del análisis de los distintos apartados que contiene este capítulo se podrá entender la importancia de esta distinción en tanto al tipo de análisis a realizar y resultados obtenidos.



FIG. 3.2.- ENSAYO DE ECO

Las técnicas de Eco e Impedancia Mecánica, al contrario que la Transparencia Sónica que permite también ensayar pantallas, se utilizan exclusivamente en pilotes, y generalmente en los pilotes con diámetros menores y siempre en unas condiciones que permitan que las relaciones longitud/diámetro de los pilotes no sean elevadas.



CEDEX

## 3.2. Técnica del eco para el control de integridad de los pilotes

### 3.2.1. Principios del método del eco

En el ensayo del Eco se provoca, con un martillo ligero de mano, un impacto en la cabeza del pilote. El impulso mecánico genera un tren de ondas que se transmite a lo largo del cilindro o barra a una velocidad que dependerá de las características del material.

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  
 $\rho$ , 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.

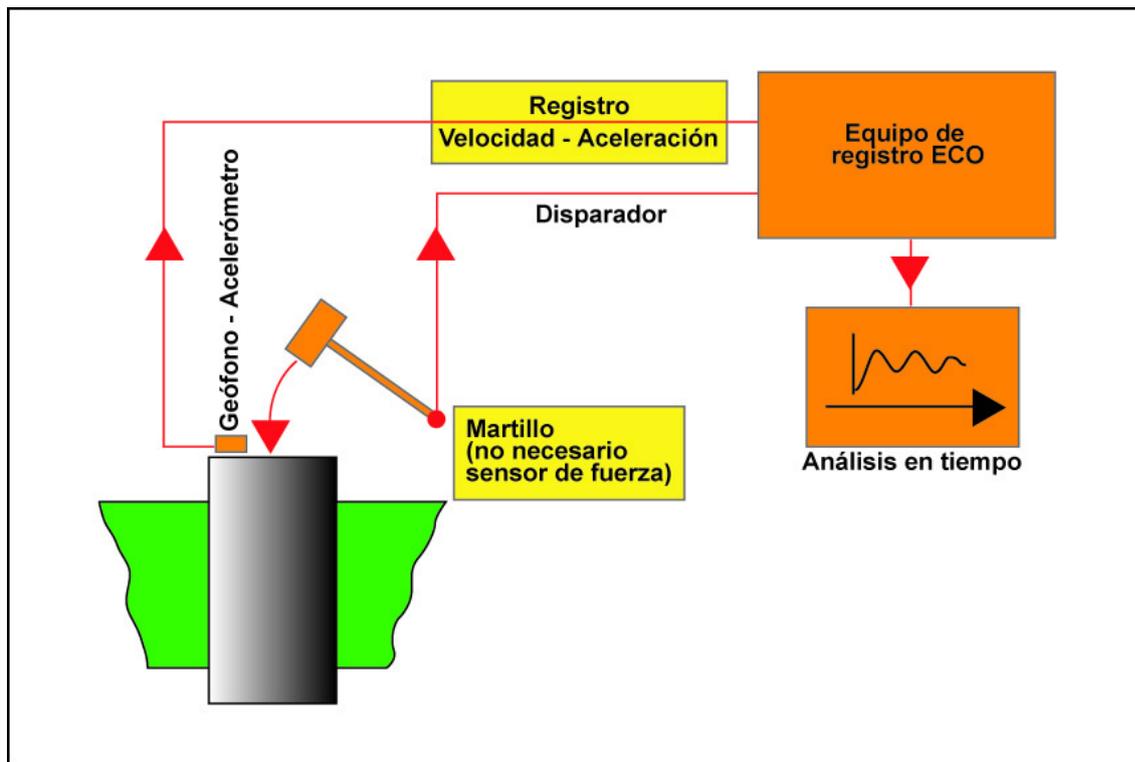


FIG. 3.3.- ESQUEMA GENERAL DE LA TÉCNICA DE ECO

Si el cilindro no está rodeado de material (terreno), la disipación de la energía del impacto es pequeña y se producirá únicamente por amortiguamiento en el material que lo constituye: hormigón-acero. Si el cilindro está rodeado de material, como en un pilote, la propagación del tren de ondas estará afectada por la transmisión de energía que se produce hacia el material que rodea al pilote.

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 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 (“Eco”) hacia la cabeza del pilote. La onda reflejada permite obtener información de los cambios físicos que se ha encon-



**CEDEX**

trado 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 (forma del pilote) o en las propiedades del material que lo constituyen y que producen ecos que permiten diagnosticar el estado del pilote son:

- Área de la sección transversal del pilote
- Densidad del material
- 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:

$$z = \rho c A$$

siendo:

z la impedancia de una sección del pilote

$\rho$  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:

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

En donde E es el módulo de elasticidad dinámico.

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 impedancia de la sección son  $c$  y  $A$ , y principalmente éste último. Por lo tanto con las reflexiones en el Eco se estarán registrando variaciones en la velocidad y sobre todo en el área transversal de los pilotes ensayados.

### 3.2.2. Cálculo de la profundidad del pilote en la curva de eco

De lo anteriormente expuesto se desprende que, en un pilote sin defectos, en un terreno homogéneo, el primer cambio de impedancia que se produce es en la punta del pilote. La reflexión que llega a la cabeza del pilote habrá recorrido una distancia  $2L$ , siendo  $L$  la longitud del pilote. Si se registra en la cabeza del pilote con un geófono o acelerómetro 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 (unos 3500-4000 m/s) se puede calcular la longitud del pilote como:

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



CEDEX

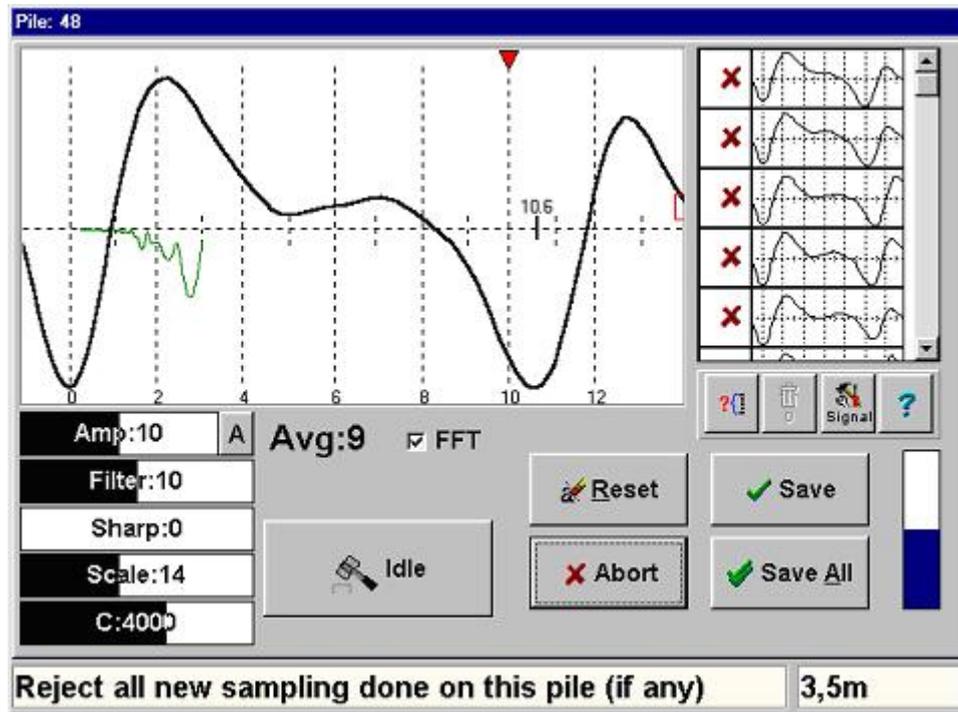


FIG. 3.4.- REGISTRO REAL DE ECO EN UN PILOTE

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:

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

### 3.2.3. Análisis de la curva de eco

#### 3.2.3.1. Registro inicial de la curva de Eco. Cálculo de la longitud

En un registro ideal de Eco se puede distinguir si la onda reflejada se ha producido al llegar a una punta de pilote empotrada o a una punta de pilote libre. En el primer caso la onda reflejada presenta en el registro distinta polaridad que el impacto inicial, mientras que en el pilote libre la polaridad es la misma. El mismo razonamiento se puede efectuar cuando la onda reflejada viene producida por un bulbo (distinta polaridad) o por un estrechamiento (misma polaridad).

En las siguientes figuras 3.5 a 3.8 se muestran las respuestas en el ECO en función de si el pilote está empotrado en punta o no.

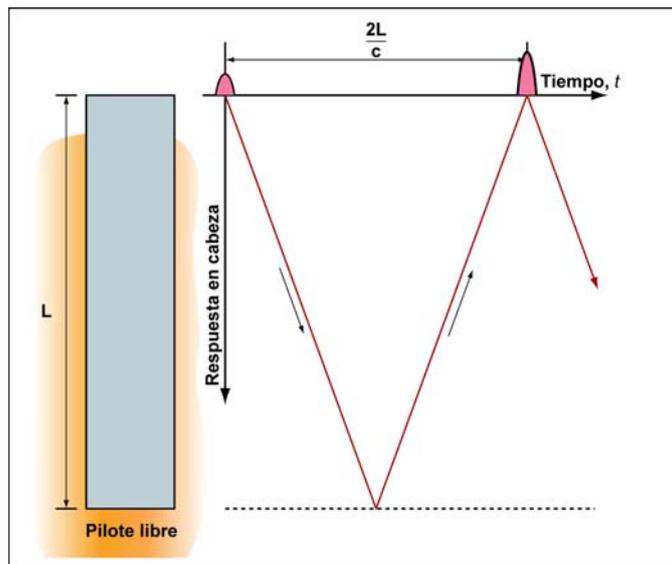


FIG. 3.5.- CURVA DE ECO TEÓRICA DE PILOTE EN CONDICIONES DE PUNTA LIBRE

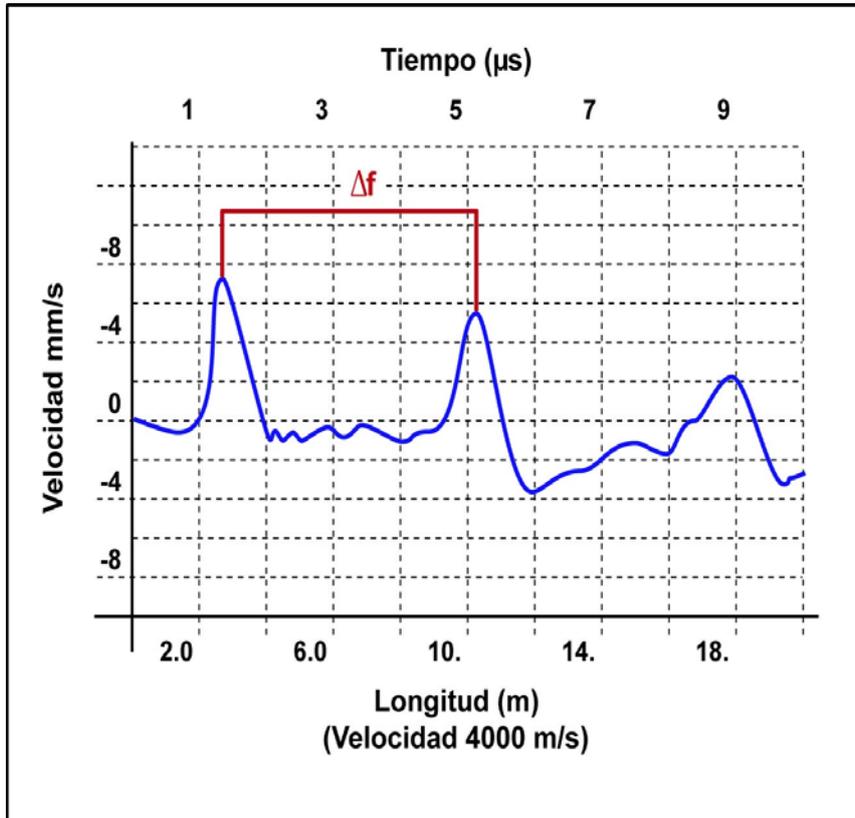


FIG 3.6.- CURVA REAL DE ECO DE UN PILOTE EN CONDICIONES DE PUNTA LIBRE

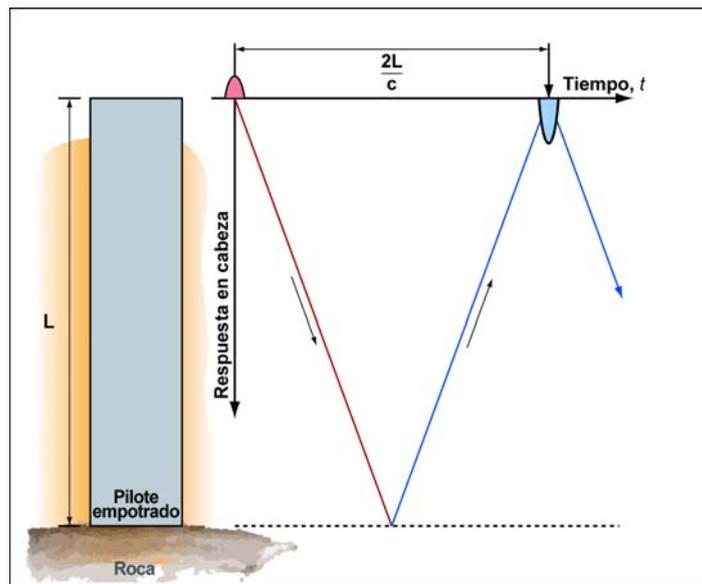


FIG 3.7.- PILOTE EN CONDICIONES DE PUNTA CON EMPOTRAMIENTO

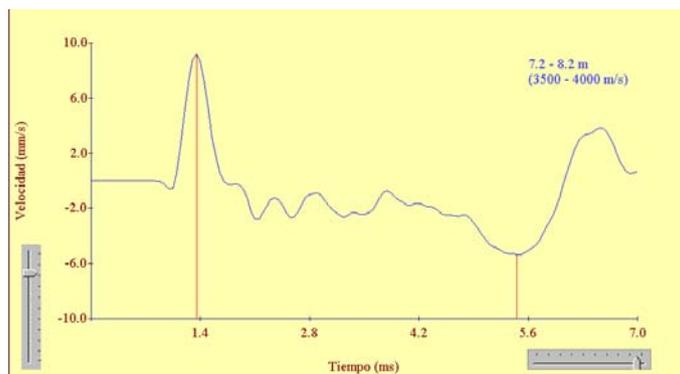


FIG 3.8.- CURVA REAL DE ECO DE UN PILOTE EN CONDICIONES DE PUNTA CON EMPOTRAMIENTO

### 3.2.3.2. Curva de Eco. Análisis de defectos

Como se ha descrito en el apartado 3.2.1. con el ensayo del Eco se puede calcular la longitud del pilote y si el comportamiento es flotante o si se produce una variación significativa de impedancia, se puede calcular la profundidad a la que se produce y estimar si se trata de una reducción de sección o un empotramiento.

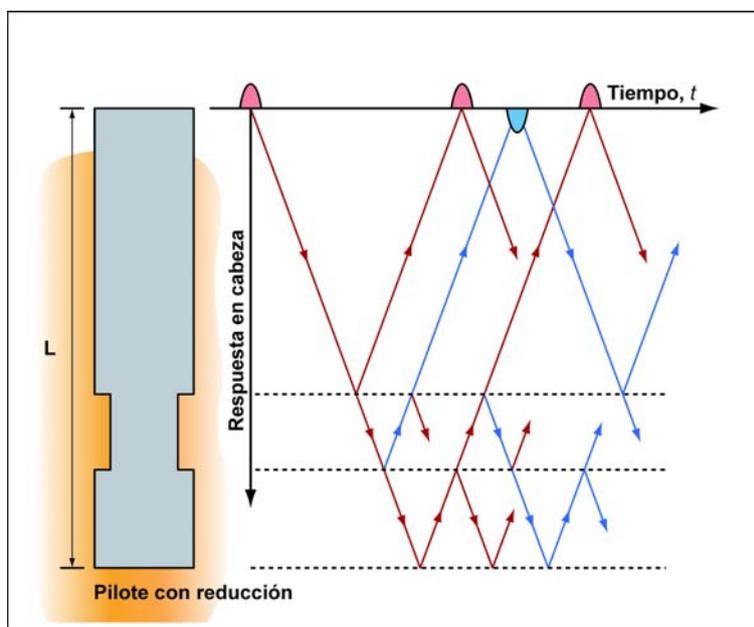


FIG. 3.9.- CURVA DE ECO TEÓRICA PARA PILOTE CON REDUCCIÓN DE SECCIÓN

El análisis de Eco permite, utilizando un término de la literatura inglesa que podría ser de aplicación en la terminología técnica de estos ensayos en España, calcular la “profundidad acústica”. Pero el ensayo no se debería limitar sólo a la identificación de un eco, sino que también debería proporcionar un análisis de integridad, que como se ha indicado es posible y es realmente necesario.

Ya que el método lo permite, se analizará que las reflexiones en el mismo sentido que las del impacto se deben a un descenso en la impedancia y en sentido contrario a un aumento de la impedancia.

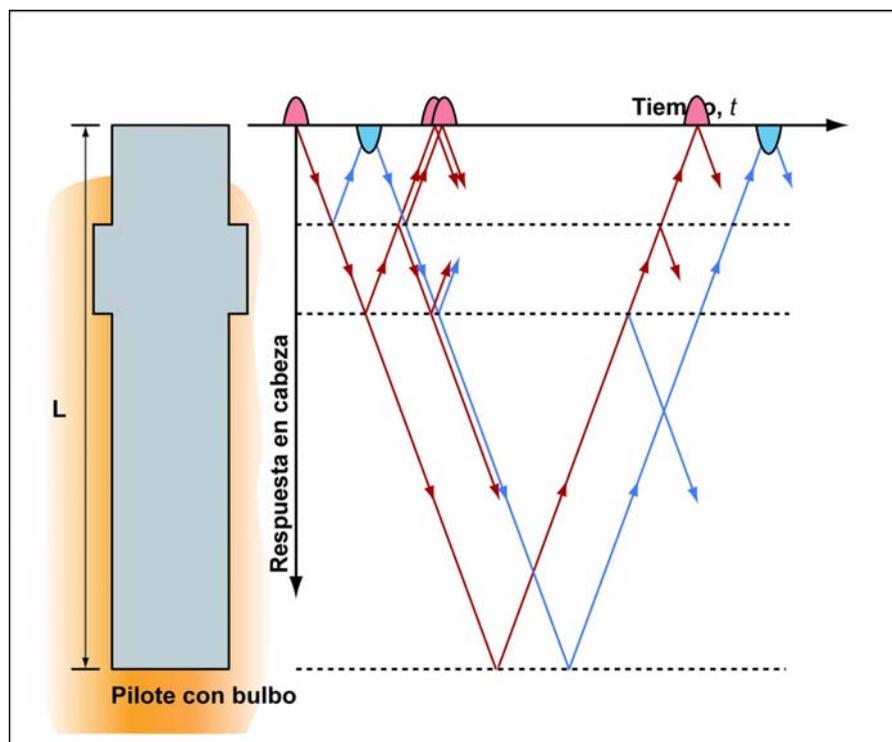


FIG. 3.10.- CURVA DE ECO TEÓRICA PARA PILOTE CON AUMENTO DE SECCIÓN (BULBO)

Como hay que indicar si se trata de un aumento o disminución de la impedancia y esto puede estar afectado por las condiciones del entorno, para la interpretación se requerirá de la utilización del perfil geotécnico y de los partes de perforación y de hormigonado.



El Eco con análisis en el tiempo,  $t$ , debe tomarse como un método sencillamente de análisis de la integridad. No puede exigirse precisión en la medida de la profundidad debido a que para el cálculo se supone una determinada velocidad de propagación.

A modo de ejemplo, la diferencia en el cálculo de la longitud del pilote, en una curva en que el tiempo de llegada del eco fuera de 10 ms, y suponiendo una velocidad de 3500 m/seg ó 4000 es:

$$e = v * t/2 = 3500 \times 0,005 = 17,5 \text{ m}$$
$$4000 \times 0,005 = 20,0 \text{ m}$$

A modo de resumen y como principio ante la interpretación en el tiempo, hay que tener en cuenta que la señal que recibamos en cabeza estará afectada por:

- a.- Las propiedades del material que forma el pilote y la atenuación que se produzca.
- b.- Las características del terreno en el que se ha ejecutado el pilote y que también atenuará la señal de forma proporcional a la rigidez de éste. El análisis se complica si hay cambios de rigidez en el terreno, ya que cambios en capas del suelo pueden producir cambios de rigidez que habrá que separar de la propia integridad del pilote.
- c.- Cambios en el propio pilote o por variaciones de las dimensiones externas (bulbos - reducciones) o en las propiedades internas (deslavados-contaminaciones). Estos cambios hacen que una parte de la onda se refleje y otra parte alcance la punta. En su descenso la onda se reducirá en amplitud, siendo necesario amplificar de forma exponencial en la misma proporción que la parte que se refleja hacia arriba. En los casos de variaciones que producen varios ecos, será difícil evaluar en qué medida está afectada la integridad.

A continuación se incluye un cuadro resumen teórico en el que se analizan e interpretan varias curvas de eco para mostrar como afectan las variaciones de impedancia.



FORMA DEL PILOTE	DESCRIPCIÓN	CURVA DE ECO
	Pilote íntegro, punta libre longitud similar a la esperada.	
	Pilote íntegro, punta empotrada y longitud similar a la esperada	
	Pilote íntegro, punta libre y longitud inferior a la esperada	
	Aumento de impedancia	
	Disminución de impedancia	
	Aumento localizado de impedancia	
	Disminución localizada de impedancia	
	Esbeltez del pilote alta o fuerte atenuación que oculta la reflexión de la punta	
	Reflexiones multiples por una discontinuidad intermedia que impide detectar la punta.	
	Perfil muy irregular del pilote en profundidad.	

FIG 3.11.- INTERPRETACION DE CURVAS TEÓRICAS DE ECO (Joram M. Amir)

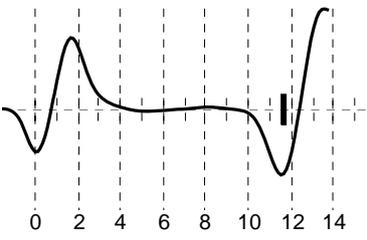
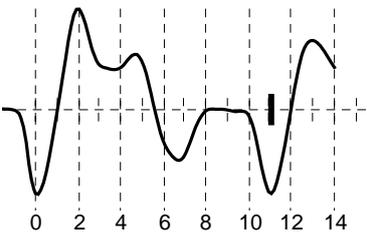
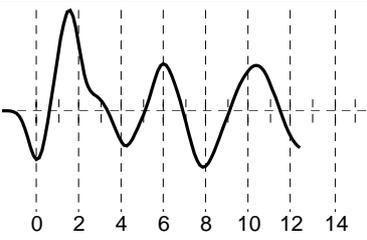
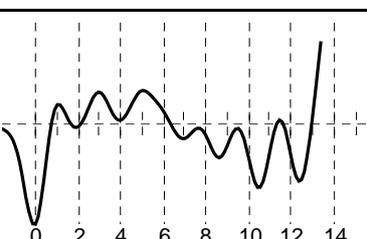
LONGITUD CALCULADA	DATOS	GRAFICO	OBSERVACIONES
11,6 m	V=4000 m/s Amplitud=26		Sin heterogeneidades
11,1 m	V=4000 m/s Amplitud=21		Aumento de sección a 5 m de profundidad
No se define	V=4000 m/s Amplitud=55		Reducción de sección a 4,2 m No se observa la reflexión de la punta
No se define	V=4000 m/s Amplitud=10		Pilote sin descabezar. No se observa la reflexión de la punta.

FIG 3.12.- INTERPRETACION DE CURVAS REALES DE ECO (Joram M. Amir)

### 3.2.4. Equipo de medida

El equipo necesario para realizar el ensayo de Eco estará compuesto por un martillo que no necesita estar instrumentado con sensor de fuerza; un sensor de velocidad (geófono) o un sensor de aceleración (acelerómetro); y un sistema de control, tratamiento y análisis de las señales. El martillo servirá solamente para generar la onda de presión y se conecta al equipo como disparador o “trigger” para iniciar la medida.



CEDEX

La aplicación de la técnica de Eco en el control de cimentaciones se desarrolló en Holanda a finales de los 60 en el Instituto TNO, y se la denominó ya en origen Ensayo de Eco Sónico. La denominación en la Norma americana ASTM para este ensayo también es la de Eco cuando el análisis se realiza en el tiempo. En la Norma francesa la técnica se denomina de reflexión y normativamente, al contrario que en la ASTM se ha separado completamente de los ensayos de Impedancia Mecánica con norma NF diferente.

En España se la conoce como ensayo de Eco y en algunas ocasiones como ensayo Sónico. Esta última denominación no parece muy apropiada y se debería de eliminar al poderse confundir con la Transparencia Sónica.

### **3.2.5. Tratamiento de señal previo (eco)**

Para facilitar la interpretación de la señal en el tiempo (curva de Eco), intentando soslayar la amortiguación, la mayoría de los equipos realizan una amplificación exponencial sobre el registro como se puede observar en la figura 3.12 , aumentando de esta manera la amplitud de la onda reflejada. Para que esta amplificación sea efectiva es necesario que el equipo utilizado pueda registrar señales de muy pequeña magnitud y que al amplificarlas puedan distinguirse del ruido eléctrico que se produce.

A continuación se muestran 4 registros de una curva de Eco típica en la que exponencialmente se amplifica el pico que se detecta a 0,03 seg.

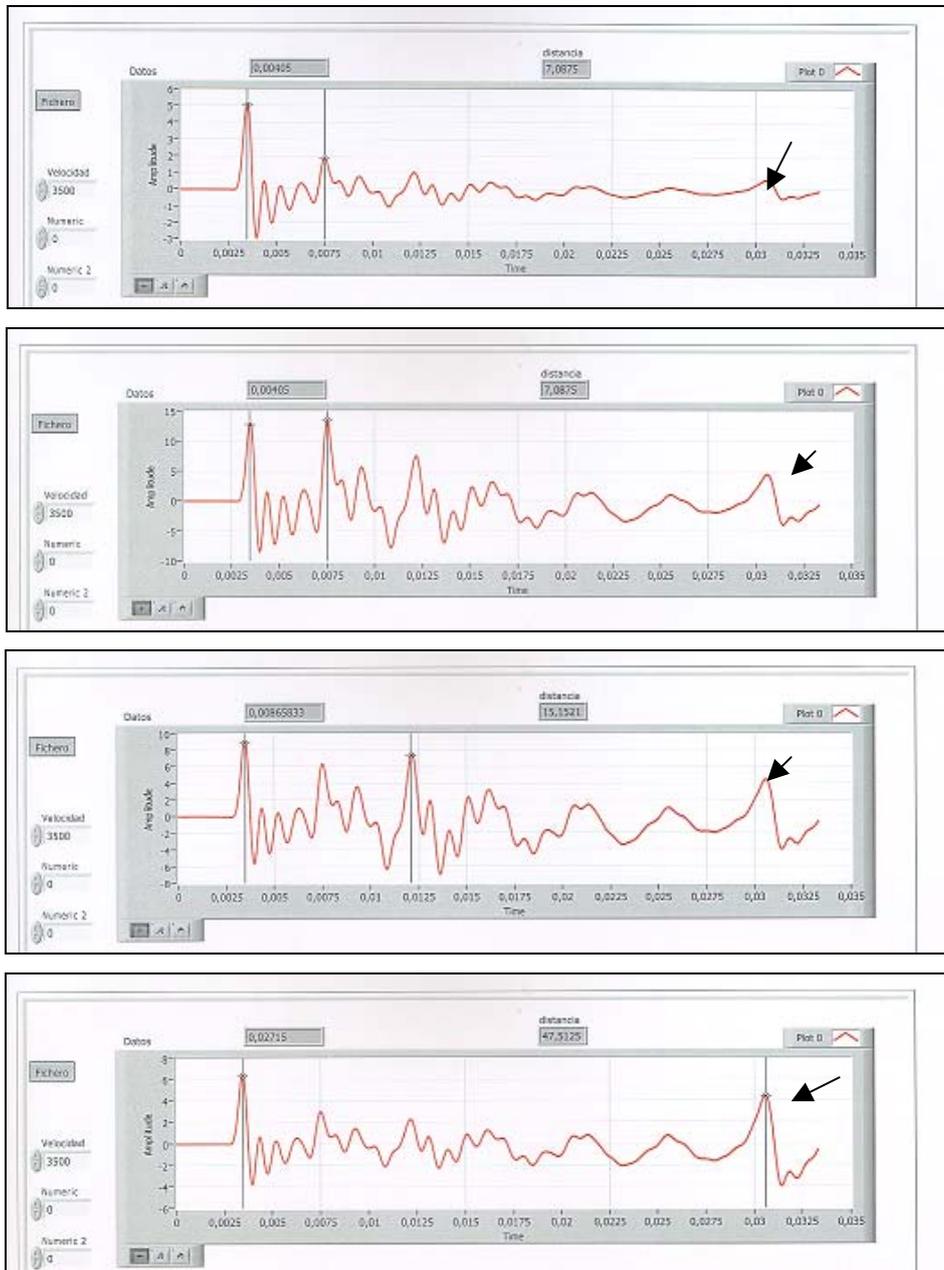


FIG. 3.13.- CURVAS DE ECO CON DISTINTAS AMPLIFICACIONES EXPONENCIALES PARA RESALTAR LA RESPUESTA A 0,03 SEG.



CEDEX

### **3.3. Técnica de la impedancia mecánica para el control de integridad.**

#### **3.3.1. Introducción**

Como ensayos de Impedancia Mecánica en España se conocen a aquellos métodos que excitan la cabeza del pilote con una fuerza conocida y analizan la respuesta del pilote a cada una de las frecuencias de excitación.

La excitación puede causarse bien mediante la acción de un vibrador (métodos vibratorios) a distintas frecuencias, o por la acción de un impacto (métodos impulsionales) del que se analiza la respuesta a las distintas frecuencias que lo componen.

En el presente documento además, se considera que para tratarse de un ensayo de Impedancia Mecánica debe existir una curva de movilidad y un análisis de rigidez y admitancia como se explicará posteriormente, es decir, no solamente disponer de un martillo instrumentado o realizar un análisis en frecuencia de la velocidad de vibración en cabeza debería ser suficiente para hablar de Impedancia Mecánica.

En este apartado la Impedancia Mecánica es por tanto una técnica de control de la integridad de pilotes en la que tanto la velocidad,  $v$ , como la fuerza,  $F$ , se analizan en frecuencia y se obtiene una curva de movilidad que las relaciona (relación  $V/F$  – frecuencia en figura 3.14). En el caso del Eco como se ha visto en el apartado anterior la velocidad en cabeza se evalúa en el dominio del tiempo, frente a la Impedancia Mecánica en el que la relación  $V/F$  se evalúa en frecuencia y en el que evidentemente se debe registrar la fuerza.

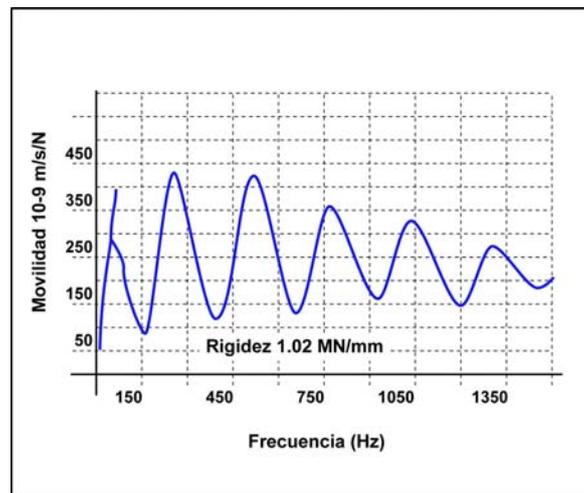


FIG 3.14.- CURVA DE IMPEDANCIA MECÁNICA DE UN PILOTE EN FRECUENCIA

### 3.3.2. Principios del método

Aunque actualmente el ensayo se realiza casi exclusivamente con métodos impulsionales mediante un impacto de martillo ligero, es más fácil de explicar los principios de esta técnica como método vibratorio, por lo que éste se describirá con detalle.

La técnica de Impedancia Mecánica como análisis de la respuesta en frecuencia de un pilote, mediante el uso de un vibrador sinusoidal, fue desarrollada por el CEBTP francés a finales de los años 60.

#### 3.3.2.1. Método vibratorio

En el ensayo vibratorio la cabeza del pilote se excita verticalmente con un vibrador electrodinámico a una frecuencia conocida y se observa la respuesta del pilote. Normalmente la cabeza se excita sinusoidalmente y el movimiento resultante, también sinusoidal, se mide con geófonos. La frecuencia de excitación se va variando, realizándose un barrido de frecuencias, y se obtiene una curva de respuesta de la amplitud de la velocidad en la cabeza para cada frecuencia.

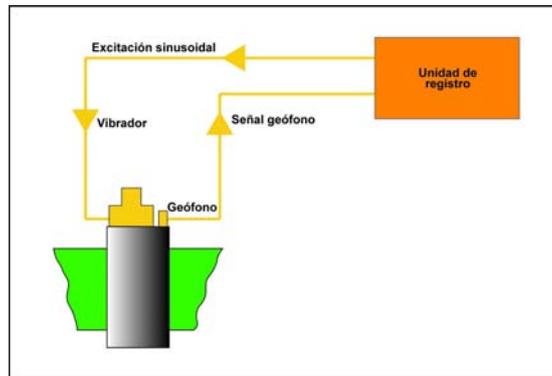


FIG 3.15.- ESQUEMA GENERAL DEL MÉTODO DE IMPEDANCIA MECÁNICA CON VIBRADOR

Si se asemeja el pilote a una varilla (cilindro-barra), las frecuencias naturales a las que se producen las resonancias se generan a unos valores que dependen de las condiciones de la punta del pilote. En un pilote con la punta libre, las resonancias se producen a las frecuencias:

$$f_i = \frac{ic}{2L}$$

$i = 0, 1, 2, 3, \text{etc.}$

En un pilote con la punta empotrada, las resonancias se producen a las frecuencias:

$$f_i = \frac{(2i+1) c}{4L}$$

$i = 0, 1, 2, 3, \text{etc.}$

La amplitud de la respuesta a las frecuencias naturales dependerá de la magnitud de la excitación y del amortiguamiento del conjunto pilote-terreno.



La primera resonancia que se produce en el pilote se genera a una frecuencia que depende de las condiciones de apoyo de la punta. Independientemente de las condiciones de apoyo del pilote, si una primera resonancia se produce a una frecuencia  $f_1$ , la siguiente se producirá a una frecuencia  $f_2$ :

$$f_2 = f_1 + 1/t$$

siendo  $t$  el tiempo que tarda la onda en realizar un ciclo de ida y vuelta:

$$t = \frac{2L}{C}$$

Siendo:  $L$  la distancia a la que se produce la reflexión de la onda  
 $c$  su velocidad de propagación en el pilote

Dos resonancias consecutivas se producen por lo tanto a intervalos de frecuencia,  $\Delta f$ :

$$\Delta f = \frac{C}{2L}$$

Con esta fórmula, conocido el valor de  $\Delta f$  entre dos resonancias consecutivas y la velocidad de propagación de la onda en el pilote, es posible calcular la distancia a la que se produce la reflexión de la onda.

### 3.3.2.2. Métodos impulsionales o dinámicos

Los denominados actualmente como “métodos impulsionales o dinámicos” de respuesta en frecuencia se desarrollaron a partir de los anteriormente descritos como vibratorios basándose en los mismos principios. En estos ensayos sin embargo, el pilote es movilizado con una fuerza dinámica de corta duración utilizando un martillo de mano. La fuerza aplicada con el mar-

tillo y la respuesta en velocidad de la cabeza se analizan en sus componentes en frecuencia mediante un analizador de espectros. Las “técnicas impulsionales” se desarrollaron por la necesidad de disponer de equipos más ligeros y rápidos que los vibratorios. El desarrollo también ha venido asociado a la miniaturización de los componentes electrónicos y a la velocidad de proceso informático.

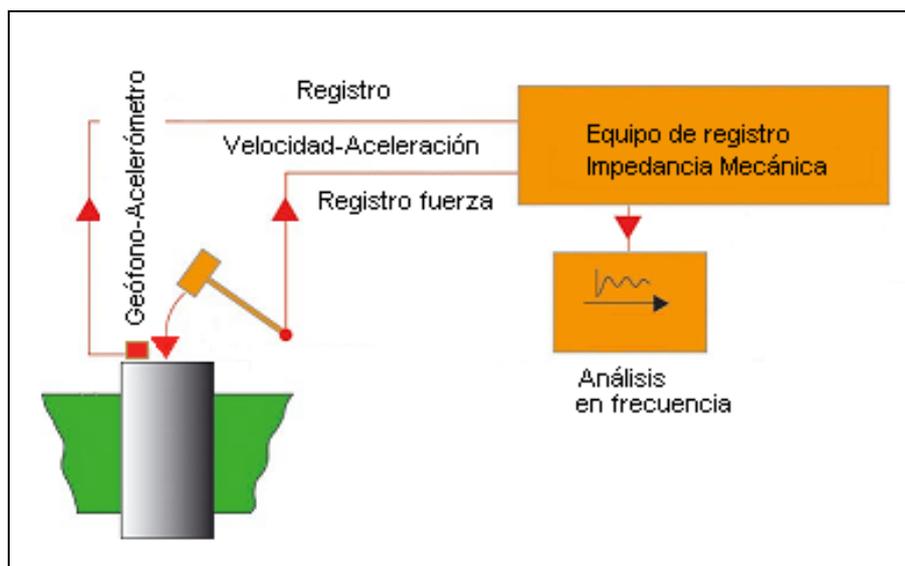


FIG. 3.16.- ESQUEMA DEL ENSAYO DE IMPEDANCIA MECÁNICA COMO MÉTODO IMPULSIONAL O DINÁMICO.

En España, ya desde su introducción y expansión a finales de los 80, se realizaron ensayos de Impedancia Mecánica mediante un martillo de mano, no habiendo referencias significativas de utilización de métodos vibratorios. A continuación sólo se describirá la técnica utilizando un martillo instrumentado sin detenerse más en el método vibratorio ya que éste no se realiza en obra actualmente.

### 3.3.3. Cálculo de la longitud del pilote

Si de la curva de respuesta en frecuencia del pilote se puede medir la diferencia de frecuencias a la que se producen las resonancias consecutivas, se puede calcular la longitud del pilote o la profundidad a la que se está produciendo la reflexión de la onda como:

$$L_f = \frac{c}{2 \Delta f}$$

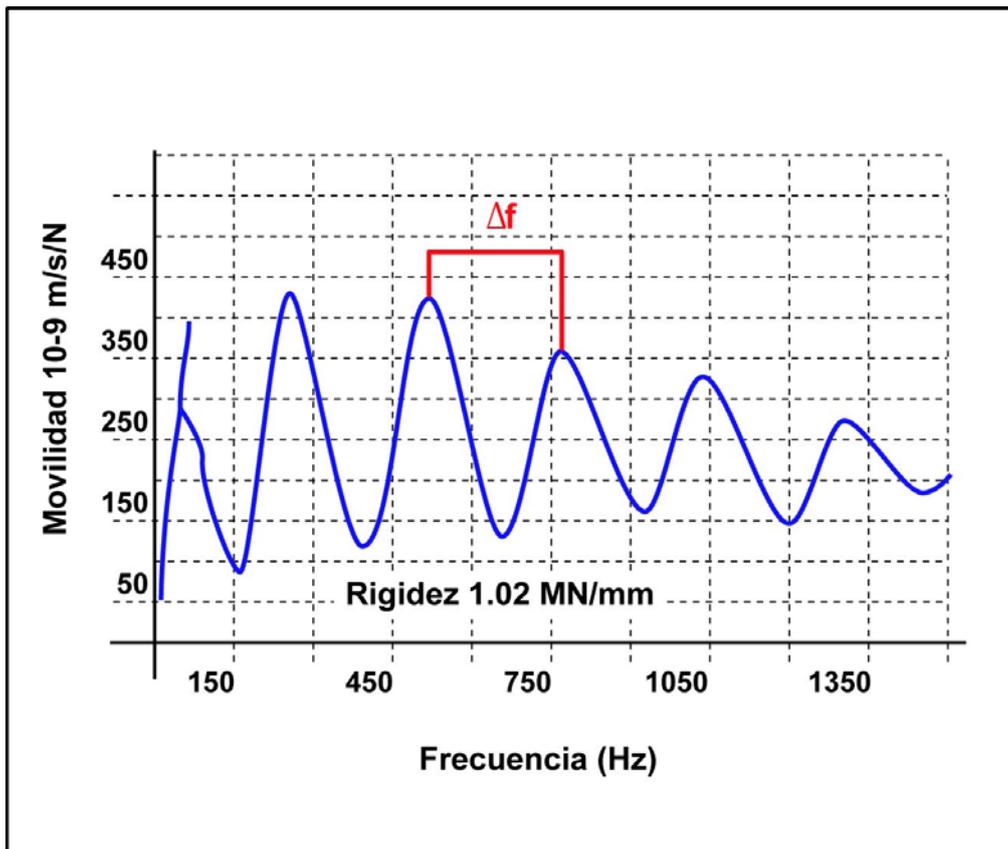


FIG. 3.17.- CÁLCULO DE LA LONGITUD DEL PILOTE EN LA TÉCNICA DE LA IMPEDANCIA MECÁNICA

Para calcular la longitud del pilote es necesario medir o conocer la velocidad de propagación de la onda en este. En el caso de pilotes de hormigón se suelen usar los valores de 3500 y 4000 m/s.



CEDEX

### 3.3.4. Análisis de la impedancia mecánica (movilidad, rigidez, admitancia)

La Impedancia Mecánica es un término muy común en el análisis de vibraciones y se define como la relación entre una fuerza sinusoidal que se aplica en un punto de una estructura y la velocidad vibratoria registrada en ese punto. La Impedancia Mecánica por tanto es un número complejo que proporciona mucha información ya que el módulo es la rigidez de la estructura a la frecuencia considerada y la fase caracteriza la naturaleza del comportamiento de la estructura (tipo muelle, amortiguador, masa).

#### 3.3.4.1. Curva de movilidad

En la Impedancia Mecánica el análisis se realiza en base a la curva de movilidad (figura 3.14). A continuación se muestra cómo se obtiene esta curva y los parámetros asociados a ella que se calculan (rigidez, flexibilidad y admitancia característica).

Como la amplitud de la curva de respuesta de velocidad registrada en la cabeza del pilote depende entre otros factores de la magnitud del impacto, para normalizar la curva de respuesta es corriente dividir la velocidad por la fuerza que se aplica con el martillo y representarla en función de la frecuencia. Se obtiene de esta manera la función de transferencia de velocidad producida por una fuerza, función que recibe el nombre de curva de movilidad. El análisis de la curva de movilidad permite además conocer otros parámetros del pilote como la rigidez y admitancia característica.

#### 3.3.4.2. Rigidez

La Rigidez de la cabeza de un pilote es el cociente entre la fuerza de excitación y el desplazamiento que se produce expresado normalmente en MN/mm, como puede observarse en la figura 3.18. El inverso de la rigidez es la flexibilidad,  $F$ . Así pues, la movilidad,  $M$ , es la derivada de la flexibilidad en el tiempo, y en frecuencia, que es el dominio en el que se analiza:

$$M = 2 \pi f F$$

A pequeñas frecuencias la curva de movilidad suele ser una recta y la pendiente de esta recta es proporcional a la flexibilidad del pilote ( $2 \pi F$ ). Esto es debido a que a bajas frecuencias de la curva de movilidad los fenómenos de inercia son insignificantes y el sistema pilote-suelo se comporta como un muelle. De esta forma, con la curva de movilidad a pequeñas frecuencias puede calcularse la rigidez de la zona próxima a la cabeza del pilote.

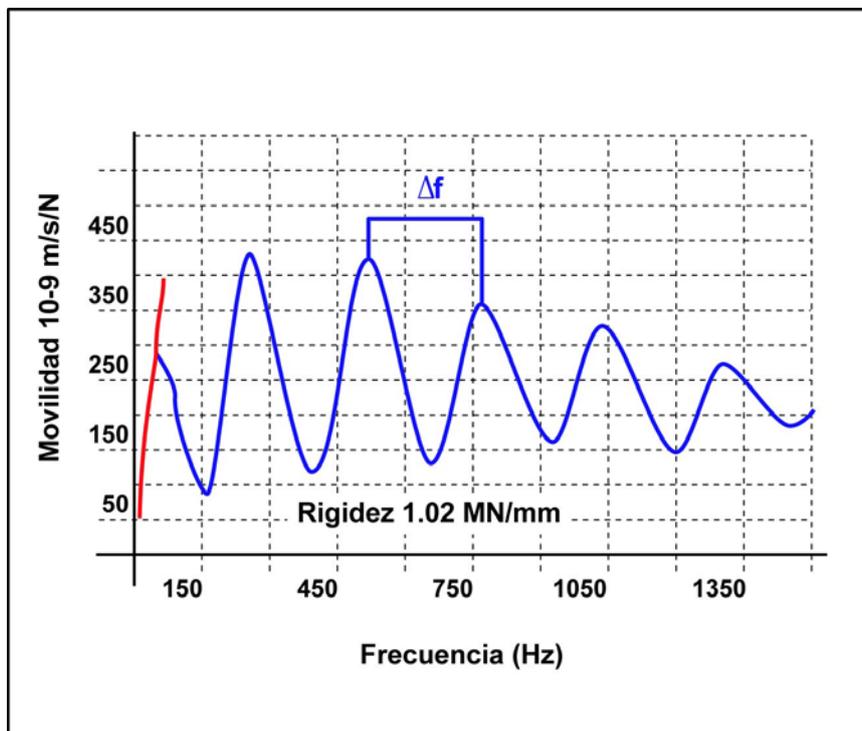


FIG. 3.18.- CURVA DE MOVILIDAD RIGIDEZ A BAJA FRECUENCIA

En un pilote la rigidez depende fundamentalmente de su diámetro, de su longitud y de las propiedades del hormigón y del terreno que le rodea. En un mismo terreno, por tanto, pilotes del mismo diámetro y de longitudes similares suelen presentar rigideces muy parecidas. Si dentro de un grupo de pilotes, alguno de los pilotes presenta rigideces muy inferiores a las del resto puede ser indicativo de algún tipo de rotura. En algunas ocasiones en las que las curvas de movilidad pueden ser difíciles de interpretar, la valoración de la rigidez de varios pilotes en



CEDEX

el conjunto de una obra puede ser de mucha utilidad para identificar pilotes que estén rotos en el entorno de la cabeza.

### 3.3.4.3. Admitancia característica

A partir de la primera resonancia, el valor de la movilidad suele oscilar alrededor de un valor que se conoce como Admitancia característica y que es el inverso de la impedancia característica del pilote. La admitancia característica del pilote es:

$$N = \frac{1}{\rho c A}$$

En donde:  $\rho$  es la densidad del hormigón  
 $c$  la velocidad de propagación de la onda  
 $A$  el área de la sección transversal del pilote

El valor medido de la admitancia característica de un pilote se puede comparar con su valor teórico para obtener una estimación de la calidad del hormigón o un aumento o disminución de sección.

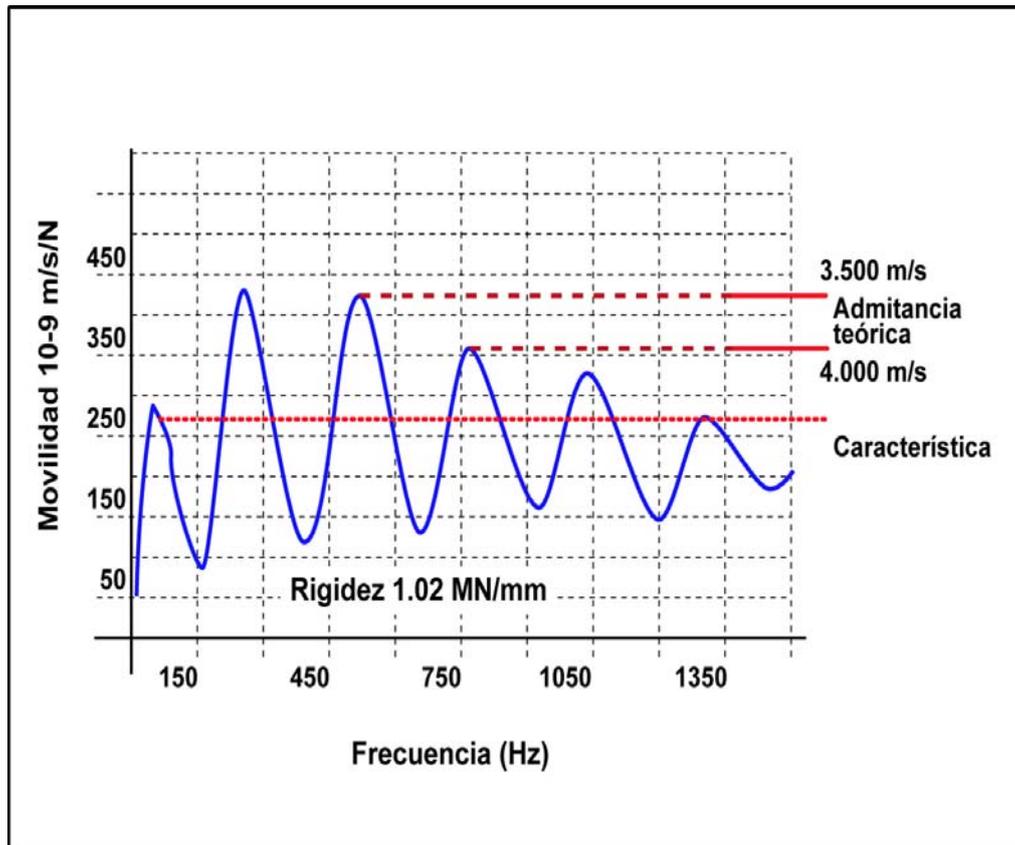


FIG. 3.19.- CURVA DE MOVILIDAD ADMITANCIA TEÓRICA

La admitancia característica, al ser independiente de las propiedades del suelo, es un índice del comportamiento del pilote libre y del amortiguamiento provocado por el terreno que lo circunda. Proporciona información muy interesante de la parte superior del pilote en los 2 o 3 primeros metros y del amortiguamiento del terreno.

En general una admitancia característica baja frente a la teórica es un indicador de un ensanchamiento en cabeza sobrediámetro o bulbo y una admitancia alta de la presencia de un hormigón de mala calidad en cabeza o una reducción de sección sobre la teórica.

A modo de ejemplo se presentan las curvas de impedancia de un pilote en el que la admitancia característica registrada en el ensayo presentaba un valor muy superior al teórico. Por el contrario, los pilotes vecinos, de características geométricas teóricas idénticas, presentaron admitancias características sensiblemente similares a la teórica.



CEDEX

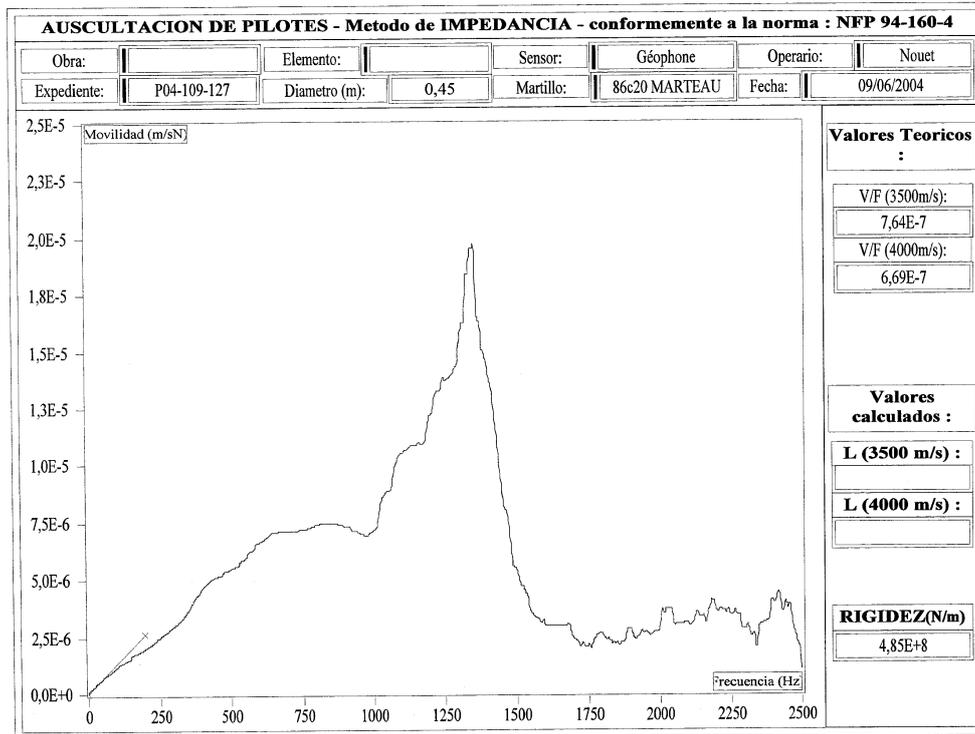


FIG. 3.20.- CURVA DE MOVILIDAD DE PILOTE CORTADO EN CABEZA

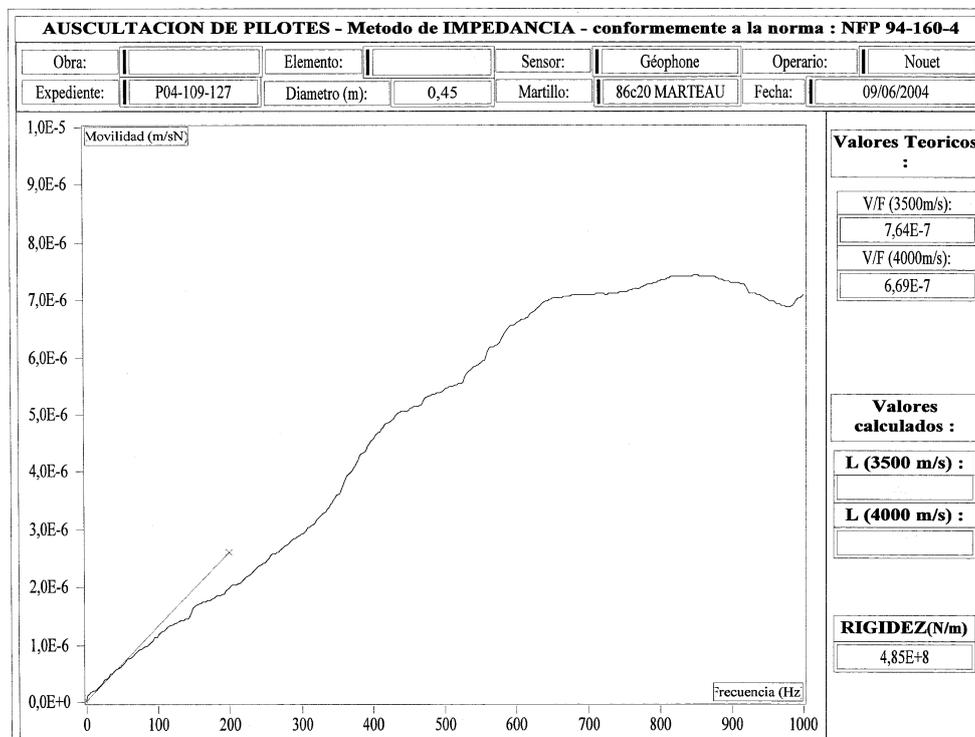


FIG. 3.21.- CURVA DE MOVILIDAD DE PILOTE CORTADO EN CABEZA (DETALLE)

Este pilote presentó, asimismo, una rigidez muy inferior a la de los demás pilotes vecinos. Se recomendó investigar la cabeza mediante una pequeña excavación, observándose el corte que se aprecia en la foto.



FIG. 3.22.- PILOTE CORTADO EN CABEZA

### 3.3.5. Equipos de ensayo

Como se ha descrito en los principios del método actualmente el ensayo de Impedancia Mecánica se realiza excitando la cabeza del pilote con un impulso y midiendo su respuesta en términos de velocidad o aceleración.

Para realizar el ensayo de Impedancia Mecánica, el martillo que se utilice tiene que estar instrumentado para medir la fuerza con una célula de carga y hay que registrarla en el tiempo.



CEDEX

Además se necesita realizar la transformación en frecuencia mediante un analizador de espectros o como es ahora más común, por medio de software en postproceso realizando una FFT.



FIG. 3.23.- MARTILLO INSTRUMENTADO CON CÉLULA DE CARGA

Los registros temporales de fuerza del martillo instrumentado y de velocidad que se reciben, se transforman en frecuencia mediante una Transformada Rápida de Fourier (FFT) y se obtienen sus componentes en este dominio.

### 3.3.6. Impedancia mecánica análisis en frecuencia. Curva de movilidad

El análisis en frecuencia que permite la Impedancia Mecánica facilita en cierta medida la interpretación de la integridad de los pilotes, aunque tendrán que tenerse en cuenta todas las consideraciones en cuanto a la calidad de la señal registrada en cabeza que se describen en el texto para poder hacer un buen análisis.

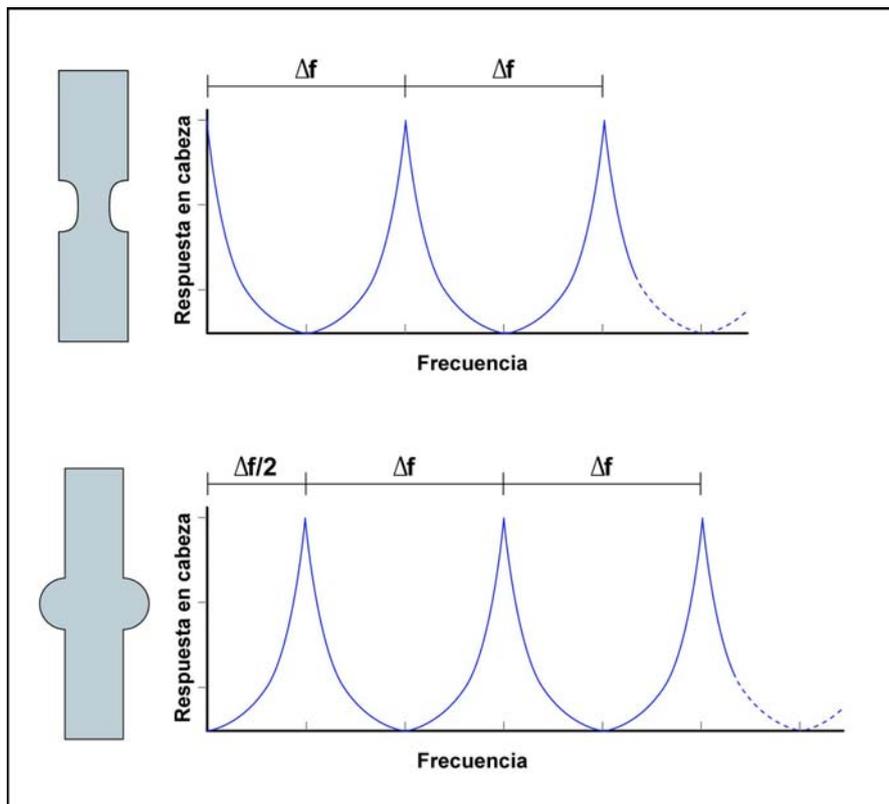


FIG 3.24.- RESPUESTAS TEÓRICA EN FRECUENCIA DE UN PILOTE CON REDUCCIÓN DE SECCIÓN (ARRIBA) Y OTRO CON UN BULBO (ABAJO)

La curva de movilidad proporciona información sobre la longitud de pilote, rigidez y admittancia y al igual que el eco está afectada por los cambios en el pilote, en el terreno circundante y la atenuación, lo que permite interpretarla para detectar reducciones de sección de bulbos. En la figura 3.24 se muestran las curvas teóricas de movilidad que se producen por la presencia de una reducción o bulbo teniendo en cuenta lo descrito en el apartado 3.3.2.1. en el que se describe el método vibratorio.

### 3.4. Instrumentación

Los equipos de Eco e Impedancia Mecánica que se comercializan permiten actualmente el tratamiento de la señal en la propia obra y en gabinete. Al realizarse generalmente tratamientos de señal antes de presentarse el gráfico definitivo en el informe, se deberían describir cuá-



**CEDEX**

les son las operaciones que se han realizado en tanto en cuanto calibración, acondicionamiento de señal, filtros, amplificación en postproceso, etc.

En los ensayos de Impedancia Mecánica y Eco se debe conseguir que los registros en un mismo pilote sean altamente repetibles y reproducibles. Esto indicará que las respuestas que se van a analizar en las curvas son realmente las significativas de un comportamiento estructural del pilote y no son provocadas por ruidos erráticos.

Algunos equipos incluso, están programados internamente para que en el caso de no obtener una buena repetibilidad no se almacenen los datos registrados o incluyen indicadores de calidad de la medida, valorando la desviación de cada golpe sobre una curva media. Es común almacenar al menos 3 ensayos por pilote en el mismo punto para analizar la curva media o cada una de las curvas si se precisa.

En el mercado se comercializan equipos muy diversos, desde los que solamente registran la velocidad de vibración en cabeza pero sin adquisición de la fuerza, hasta los que hacen análisis combinados para obtener perfiles de impedancia en profundidad, etc. Hay que tener en cuenta que una determinada selección de la instrumentación permitirá realizar una técnica u otra por lo que habrán de considerarse las diferencias que se han expresado en los apartados anteriores entre el Eco y la Impedancia Mecánica. La diferencia estará también finalmente en los registros y serán distintos los análisis y los tratamientos de señal que se realicen.

Se hará referencia al final del documento a las técnicas asistidas de interpretación basadas tanto en el Eco como en la Impedancia Mecánica y a cómo se utilizan las 2 técnicas combinándolas para ayudar a interpretar el estado del pilote.

### **3.4.1. Muestreo**

Los elementos de la cadena de medida de los equipos de Eco e Impedancia Mecánica que afectan al registro y que se tratan a continuación son:

- **Eco**
  - 1.- Sensores de medida de la vibración
  - 2.- Equipo de registro, acondicionamiento y análisis de señal
  
- **Impedancia Mecánica**
  - 1.- Mecanismo de golpeo instrumentado
  - 2.- Sensores de medida de la vibración
  - 3.- Equipo de registro, acondicionamiento y análisis de señal

#### **3.4.1.1. Sensores**

Los sensores utilizados para registrar la respuesta en cabeza del pilote tanto si se desea realizar el ensayo de Eco como el de Impedancia Mecánica, deben presentar un buen contacto con el elemento a auscultar y generalmente son, o un acelerómetro piezoeléctrico o un sensor de velocidad (Geófono). La elección del sensor es muy importante desde el punto de vista del registro. Se deberá tener en cuenta el amortiguamiento y la frecuencia de corte del geófono que se utiliza y en el caso del acelerómetro sus características.

La norma ASTM indica que los acelerómetros tendrán que tener una respuesta lineal hasta 200 g e indica también que tendrán frecuencias de resonancia de al menos 30 kHz. En el caso de utilizar geófonos o sensores de desplazamiento, las características deben de ser similares en rango a las de los acelerómetros.

Sin considerar errores que puedan venir derivados de integraciones de la señal de aceleración o velocidad para obtener desplazamientos, la calidad de la señal registrada es esencial ya que los datos que se almacenan servirán posteriormente para la interpretación del pilote tanto si se realiza en el tiempo como en el Eco o si se efectúa un análisis en frecuencia como en la Impedancia Mecánica. Por lo tanto, una buena elección de los sensores es tan necesaria como una



**CEDEX**

buena calidad o resolución del equipo de registro y análisis. En el cálculo de la precisión que vamos a obtener finalmente se deberá considerar toda la cadena de medida.

### **3.4.1.2. Equipo de registro**

La aptitud para detectar pequeñas anomalías será lo más importante del equipo de medida. No se debe olvidar que una zona de heterogeneidad plana de poco espesor en el fuste puede tener mucha importancia en la integridad estructural del pilote, en especial si éste además es de poca longitud. Al utilizar la velocidad de propagación de las ondas elásticas en el hormigón, la precisión en el cálculo de la longitud del pilote será función de la resolución en el tiempo (muestreo) en el Eco y en la frecuencia para la Impedancia Mecánica.

Una baja resolución puede llevar en casos extremos a producir malas interpretaciones. Por ejemplo, puede ocurrir que se refleje una reducción de sección significativa que oculte cortes completos de sección próximos por debajo. Si la resolución no es buena, la interpretación no permitirá detectar este corte inferior que puede afectar tan claramente al elemento.

Sirva como ejemplo a la hora de valorar un equipo, que para detectar en el hormigón 2 reflectores que estén separados 0,4 m, la diferencia en el tiempo de llegada es de 200 microsegundos. Esto significa que para separarlos claramente sería necesario al menos un muestreo de unos 50 microsegundos que correspondería en frecuencia a unos 5 kHz.

Sin embargo no todo se soluciona con una buena resolución del equipo, ya que detectar las reflexiones con la precisión de 0,4 m del ejemplo anterior es difícil en la práctica al no poderse generar un impacto de alta frecuencia sin ruidos o una respuesta errática. Con un martillo de mano, además, se complica si cuando se golpea la cabeza del pilote la superficie de impacto no está pulida. La calidad del impacto es muy importante incluso crítica en la Impedancia Mecánica y se acrecienta más en los pilotes con grandes diámetros al ser difícil generar ondas planas en la parte alta del pilote.



También hay que considerar que para la propagación en el sistema pilote-suelo se usa la teoría de propagación en una barra y esto supone que la longitud de la onda es mayor que el diámetro del pilote. Esta condición en cierta medida no es compatible con una alta resolución. Sin embargo, no se pueden usar longitudes de onda cortas en pilotes de diámetro importante ya que se genera dispersión en las ondas y distorsiones en el tamaño de los ecos.

El tratamiento que se realiza de la señal una vez que se ha registrado, es una de las capacidades que los fabricantes de equipos utilizan como diferenciación de la calidad de la medida, sin embargo se debe insistir en que cualquier tratamiento debe hacerse sobre señales de calidad.

Si el ensayo no se realiza correctamente no habrá tratamiento posible que permita un correcto análisis.

En el caso de registrar la señal de la velocidad y la fuerza, el acondicionamiento debe ser similar para que cuando se realice el paso al dominio de la frecuencia se tengan similares desfases y diferencias en amplitud.

Sobre las señales registradas en pilotes de una misma obra, de similares características y en similares condiciones geotécnicas, es conveniente que la amplificación sobre las curvas sea similar y así se presente en el informe, ya que además nos dará una idea de la atenuación que se produce (como se verá en el apartado 3.7) y de la calidad del golpe.

### **3.4.1.3. Mecanismo de golpeo (Impedancia Mecánica)**

Si se trata de realizar la técnica de la Impedancia Mecánica el martillo debe proporcionar un espectro suave en frecuencia y estar instrumentado con una célula de carga. También se puede instrumentar el martillo con un acelerómetro y calcular la fuerza considerando su masa en vez de instalar una célula de carga.

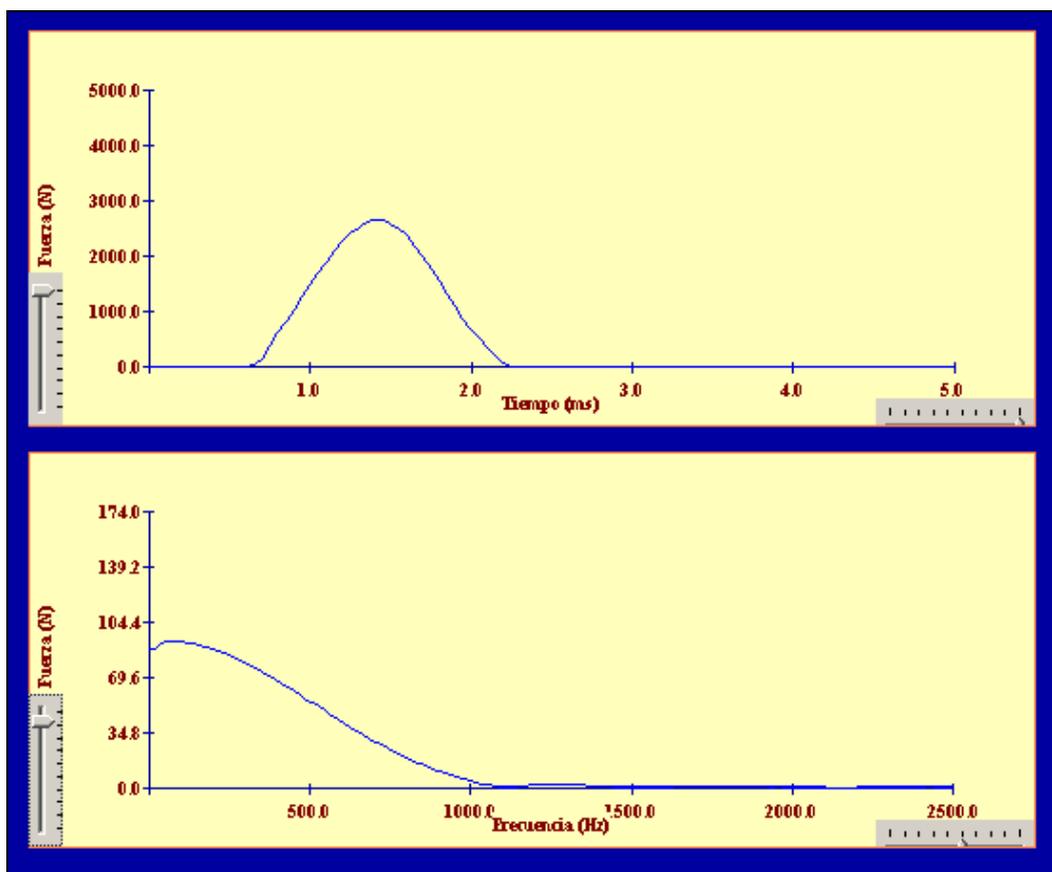


FIG. 3.25.- REGISTRO DE LA FUERZA APLICADA CON UN MARTILLO DE MANO EN LA CABEZA DEL PILOTE EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (ARRIBA) Y EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA (ABAJO).

### 3.5. Verificación de equipos

Tanto para los ensayos de Eco como de Impedancia Mecánica y en base a algunas normas como la francesa y la americana ASTM, se debería tener en cuenta la capacidad del equipo, exigiendo en el ensayo incertidumbres máximas sobre la medida en frecuencia y en tiempo y calibraciones de los sensores con precisiones en función de su rango. Realmente exigir estas incertidumbres a ensayos cualitativos que sobre todo deben asegurar o no la continuidad del pilote puede resultar innecesario. Al realizar el cálculo de profundidades es mayor la propia incertidumbre de la velocidad supuesta (3500 – 4000 m/s) como se observa en las fórmulas del cálculo de la longitud en ambos métodos:

$$L = \frac{V_c}{2\Delta f}$$

$$L = \frac{V_c t}{2}$$

Sin embargo, aunque en determinadas cuestiones exigir precisiones altas no parece imprescindible, sí que resultan interesantes las indicaciones normativas en cuanto a capacidades que deben cumplir los equipos. Así por ejemplo, según la norma ASTM, la señal analógica registrada tiene que digitalizarse con un registrador de 12 bits de resolución y con un filtro de paso bajo en frecuencia de 15 kHz. Considera la norma que la precisión en el muestreo digital en frecuencia es crítica y el reloj debe tener una precisión de 0,01 % e incluso se prohíben los registradores analógicos.

Para la caracterización de los equipos pueden considerarse las siguientes características:

- a) Rango: capacidad del sistema para diferenciar la señal más pequeña posible (fondo del pilote) en comparación con la señal generada (impacto en cabeza). Generalmente los equipos tienen rangos mayores a 1:4000 pero esto se consigue amplificando la señal del geófono o acelerómetro por medio de software.
- b) Resolución del convertidor analógico-digital: Generalmente ya todos son mayores de 12 bits y no afectan a la conversión en amplitud que se obtiene al digitalizar.
- c) Velocidad de muestreo: refleja cuantas muestras se toman en un intervalo de tiempo determinado. Actualmente con las tarjetas de adquisición este parámetro no suele plantear problemas ya que hay incluso tarjetas PCMcia de pequeño tamaño que adquieren hasta velocidades de 20 millones de muestras por segundo.

Estos aspectos serán los que hay que valorar antes de seleccionar un equipo de toma de datos.



CEDEX

### **3.6. Preparación del pilote. Realización del ensayo**

Para obtener los mejores resultados posibles en el ensayo de un pilote con la técnica del Eco, es necesario que la cabeza esté convenientemente preparada habiendo descabezado el pilote. Para realizar el ensayo de Impedancia Mecánica la preparación será algo más exigente. No se podrá hacer una buena interpretación del estado del pilote sin una buena toma de datos.

Para realizar el ensayo de Impedancia Mecánica, el geófono o acelerómetro tiene que estar bien adherido al hormigón, mediante una grasa de silicona o material de baja impedancia acústica como el que se utiliza en los palpadores ultrasónicos. En el caso del Eco esto tiene que tomarse como una recomendación ya que en muchas ocasiones sencillamente se sostiene el geófono o el acelerómetro con la mano durante el ensayo.

Al igual que en la técnica de la Transparencia Sónica, conviene que cuando se realicen los ensayos, el hormigón tenga al menos entre cinco o siete días de edad o haya alcanzado una resistencia a compresión de al menos el 75 % de la de proyecto. Esta es una recomendación que se presenta tanto en la normativa inglesa como en la francesa y norteamericana.

El geófono o acelerómetro y el martillo deben estar colocados en la posición correcta y sobre un hormigón sano en un pilote correctamente descabezado. La preparación más apropiada de la cabeza del pilote para el ensayo de integridad es la siguiente:

- Si es posible, los pilotes deben ser ensayados descabezados a la misma cota que la prevista de encepado y en el hormigón sano. El hormigón de mala calidad o fisurado y que suene hueco deberá eliminarse dejando la superficie horizontal.
- Las armaduras deben apartarse, en la medida de lo posible, quitando los cercos, para permitir que haya espacio donde golpear con el martillo y que no se golpeen las barras produciendo vibraciones.
- Si el ensayo a realizar es la Impedancia Mecánica se tienen que preparar dos superficies, una para el martillo en el centro del pilote y otra excéntrica para el geófono. Estas

superficies deben tener unos 100 mm de diámetro y habrá que prepararlas lo más lisas posible usando una radial o amoladora y dejándolas limpias de polvo. En la figura 3.26 se muestra la preparación adecuada para realizar ensayos de Impedancia Mecánica.

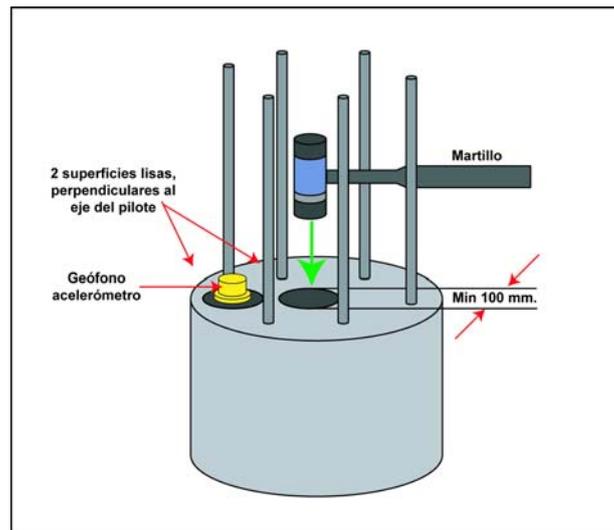


FIG. 3.26.- PREPARACIÓN DE LA CABEZA DEL PILOTE PARA REALIZAR EL ENSAYO DE IMPEDANCIA MECÁNICA

- Si se realizan ensayos de Eco no suele ser necesario preparar estas superficies aunque si es conveniente descabezar adecuadamente el pilote.
- En el caso de la Impedancia Mecánica y aunque pudiera parecer innecesario, se debe de dar mucha importancia a la preparación de la cabeza del pilote para realizar un buen golpeo con el martillo. El impacto se debe separar unos 300 mm del sensor de medida del movimiento. El que se disponga de una superficie lisa específica para golpear es muy necesario, ya que de ello depende que se pueda producir un impacto con tiempo de contacto lo mínimo posible, que permita que la señal reflejada sea lo más adecuada posible.

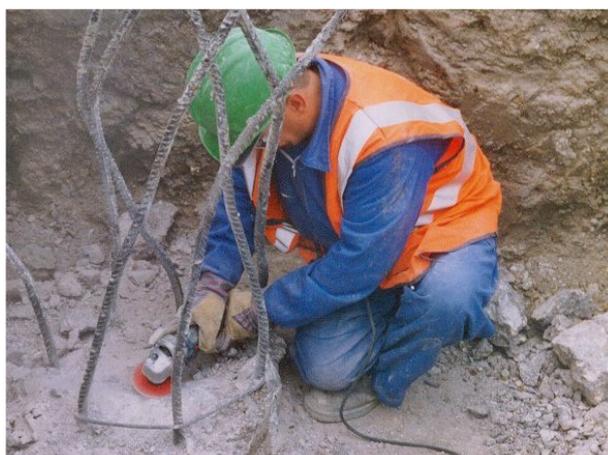


FIG 3.27.- DESCABEZADO DEL PILOTE Y PREPARACIÓN CON DISCO DE DIAMANTE PARA REALIZAR EL ENSAYO DE IMPEDANCIA MECÁNICA

- El sensor se coloca próximo a las armaduras en su interior y se golpea con el martillo en el centro. El peso del martillo se puede ajustar en función de los resultados que se obtengan, sin embargo, más que el peso, que suele ser de aproximadamente un kilo, lo importante es el tiempo de contacto del golpe que se ha producido. En algunas publicaciones se propone usar martillos metálicos o martillos de goma en función del diámetro y longitudes de los pilotes. Realmente con esto se está ajustando el tiempo de contacto, que es más importante que el peso del propio martillo en sí.
- Tampoco se puede olvidar que hay que evitar que el hormigón de limpieza del encepado esté en contacto con el pilote a ensayar, ya que la movilización de la cabeza del pilote con el impacto no será adecuada.



- Para pilotes de gran diámetro puede ser conveniente colocar el sensor de velocidad/aceleración en varios puntos, analizando el ensayo para estas disposiciones. Como ejemplo, las normas francesas descartan el empleo de estos métodos para diámetros superiores a 1 m, sin embargo se pueden obtener buenos resultados con suficiente resolución para diámetros muy superiores. Al igual que con la esbeltez del pilote la limitación en diámetro dependerá del entorno geotécnico en que se encuentre el pilote. Si los ensayos no son repetibles no se deberán utilizar los datos para la interpretación y será necesario preparar el pilote para poder alcanzar las condiciones de repetibilidad. En cualquier caso como se ha indicado en otros apartados, para grandes diámetros es más adecuado utilizar la técnica de la Transparencia Sónica.

Lo antes descrito tiene por objeto que la calidad del ensayo sea la adecuada. Para evitar señales con ruidos erráticos, será necesario prestar atención a que los ensayos no se realicen en momentos de vibración de máquinas compactadoras próximas o martillos compresores descazando, ya que se producen ruidos que afectan sobre todo a la valoración de la rigidez del pilote si se tiene previsto realizar ensayos de Impedancia Mecánica.

Se deberá evitar hacer superficies con morteros adheridos al hormigón en cabeza para colocar los geófonos o acelerómetros ya que una mala adherencia puede provocar despegues del sensor y ruidos erráticos.

### **3.7. Influencia del terreno de cimentación en los ensayos de eco e impedancia mecánica. Atenuación de señal. amortiguación. Esbeltez. Cambios de impedancia mecánica**

Como se ha indicado en los principios de los métodos de Eco y de Impedancia Mecánica, ambos se basan en el análisis de las ondas reflejadas por cambios significativos en las propiedades del pilote. En este apartado se trata la influencia del entorno geotécnico en los resultados obtenidos por estas técnicas y las variaciones en las propiedades del pilote.



CEDEX

### 3.7.1. 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 disipación 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 esbelteces de hasta 30:1 o superiores, e incluso en la bibliografía se describen resultados buenos con esbelteces de 60:1 en suelos aluviales. Si el terreno es rígido puede ser muy difícil analizar los registros de pilotes con esbelteces incluso inferiores a 20:1.

Aunque realmente sea exagerado, la norma francesa considera como campo de aplicación de ambas técnicas esbelteces entre 10 y 30 y diámetros inferiores a 1 m, salvo si el pilote está en suelos blandos en los que se puede aumentar la esbeltez.

En la figura 3.28 se muestran algunas curvas de Eco con la misma escala vertical en las que se observan diferencias en los reflectores ya que se encuentran en terrenos más o menos rígidos.

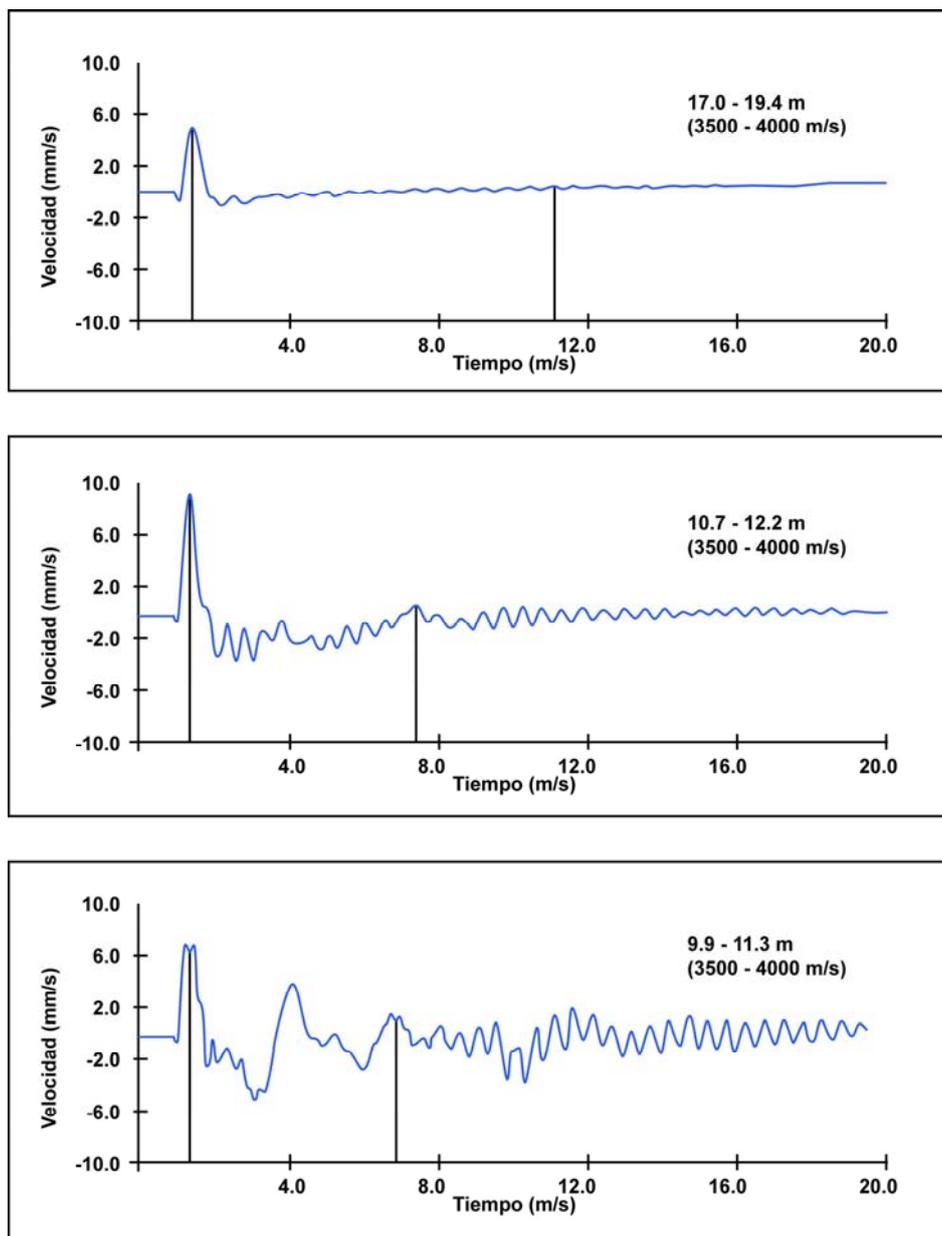


FIG. 3.28.- CURVAS REALES DE ECO EN SUELOS CON DISTINTA RIGIDEZ

La limitación en esbeltez hace que generalmente, no se puedan ensayar micropilotes con estas técnicas ya que al tener diámetros muy pequeños rápidamente queda limitada la profundidad de investigación. La esbeltez por tanto, es muy importante para el análisis de resultados debido a la atenuación, de tal forma que en general se considera que estos métodos no son apropiados para ensayar micropilotes.



Si no se detecta la punta es evidente que no se puede estimar la atenuación y la longitud o profundidad de auscultación, hasta la que se podría auscultar en una determinada obra. Sin embargo, disponer de datos de atenuación en un determinado entorno geotécnico para un cierto pilote, es muy interesante en grandes obras de cimentación.

En este sentido, es muy interesante la gráfica para pilotes conocidos en determinados entornos geotécnicos que se presenta a continuación:

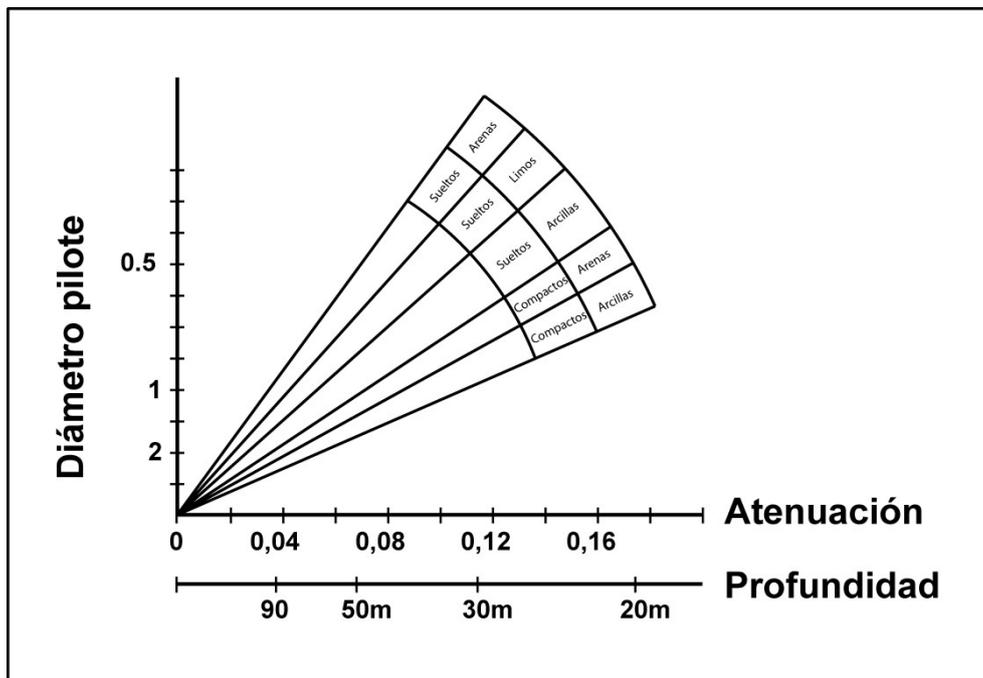


FIG. 3.29.- GRÁFICO DE ATENUACIÓN SEGÚN BRIARD

La atenuación puede por sí misma impedir detectar la punta del pilote, pero además la punta puede quedar enmascarada por la presencia de cambios de impedancia en el terreno circundante.

### 3.7.2. 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. Como se ha mostrado en la descripción de los métodos de Eco y de Im-

pedancia Mecánica, 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.

Como se observa en los 4 ejemplos siguientes si se considera un pilote íntegro de 10 m (ejemplo 1) y se simula un defecto a 5 m de profundidad con un espesor de 1 m que afecta con una reducción de un 10% (ejemplo 2) no se detecta ninguna diferencia en la curva de impedancia. Si la reducción es del 20% (ejemplo 3) ya si es detectable aunque no fácil de interpretar y si la reducción es del 30% (ejemplo 4) se interpreta fácilmente.

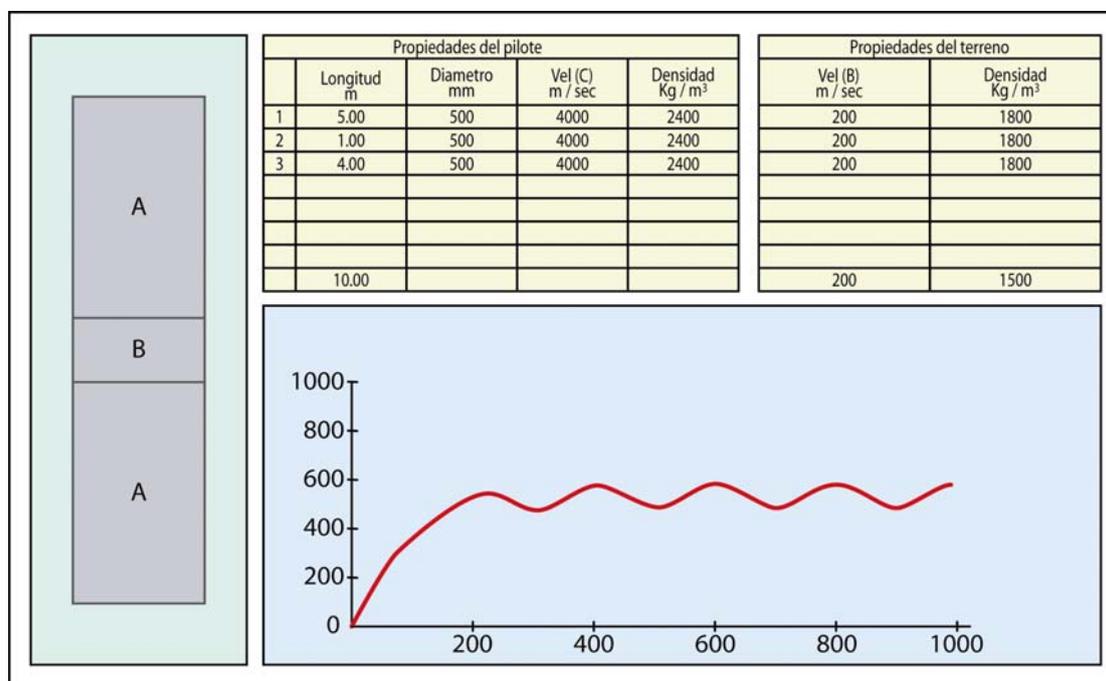


FIG. 3.30.- CURVA DE IMPEDANCIA MECÁNICA SIN REDUCCIÓN DE SECCIÓN (EJEMPLO 1)

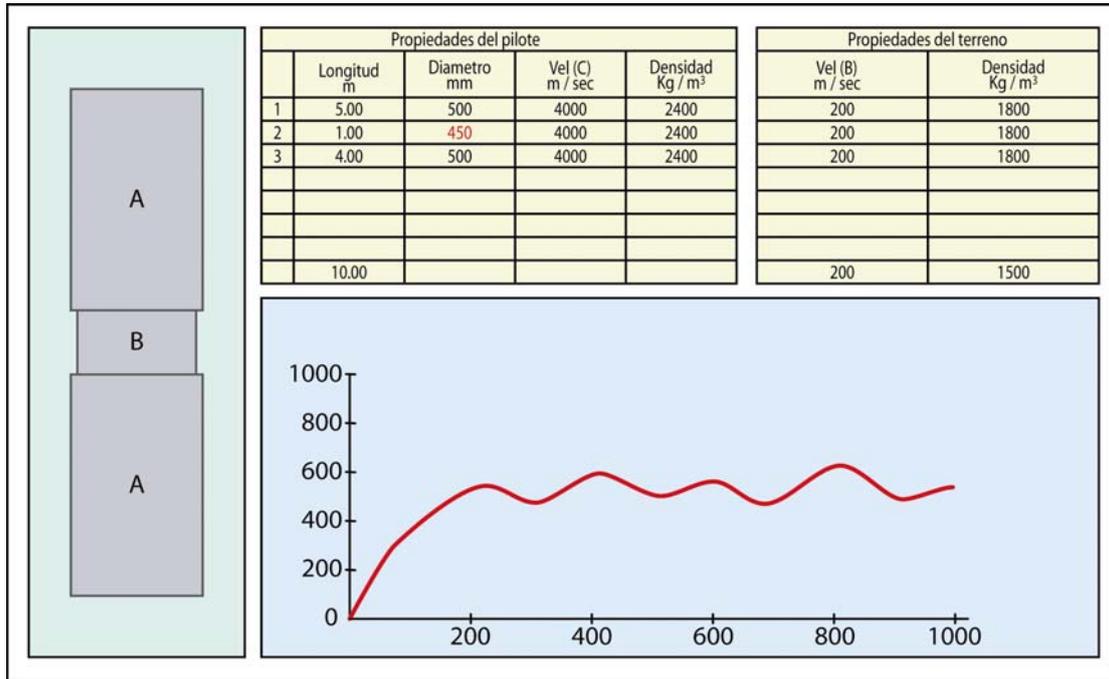


FIG. 3.31.- CURVA DE IMPEDANCIA MECÁNICA CON REDUCCIÓN DE DIAMETRO DEL 10 % (EJEMPLO 2)

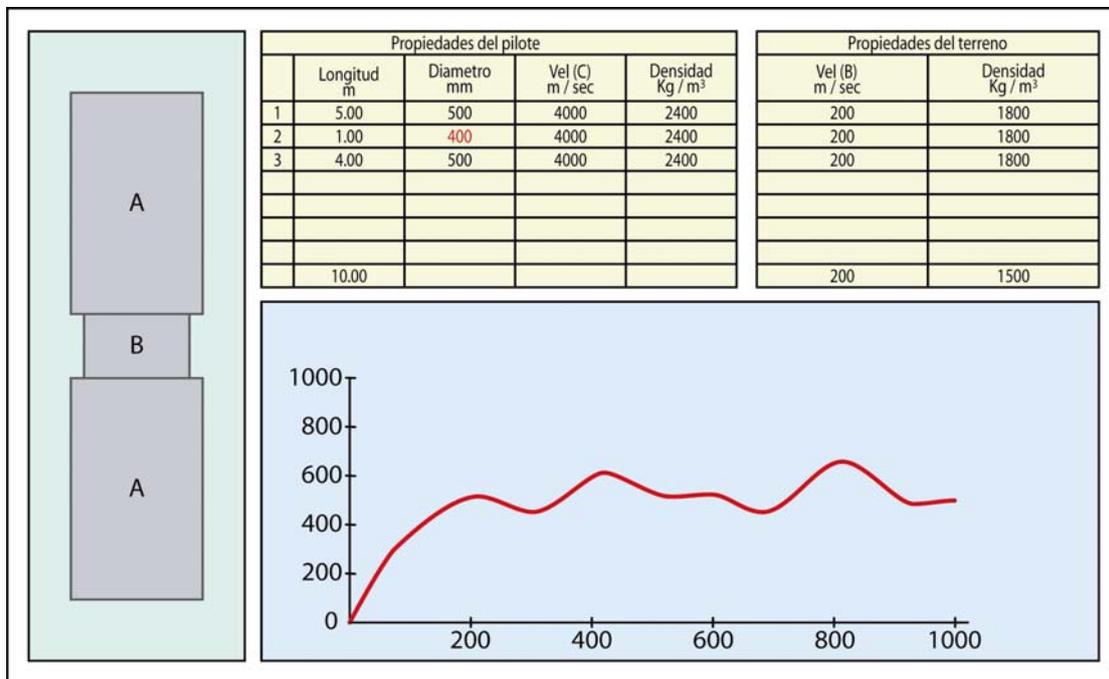


FIG. 3.32.- CURVA DE IMPEDANCIA MECÁNICA CON REDUCCIÓN DE DIAMETRO DEL 20 % (EJEMPLO 3)

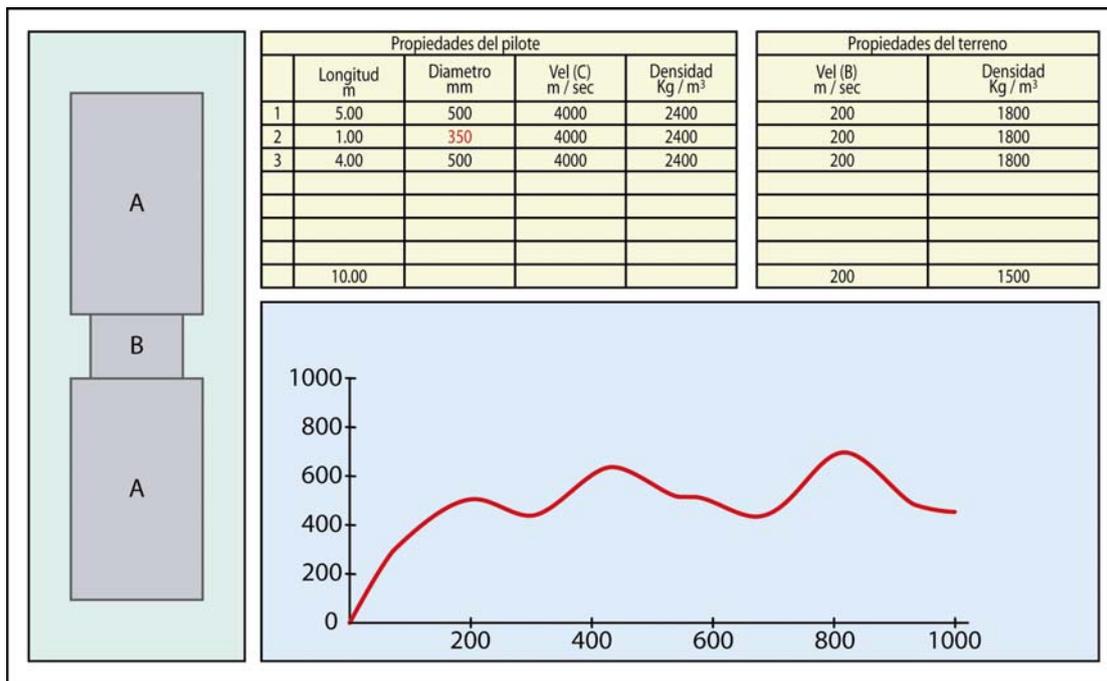


FIG. 3.33.- CURVA DE IMPEDANCIA MECÁNICA CON REDUCCIÓN DE DIAMETRO DEL 30 % (EJEMPLO 4)

Con variaciones de impedancia de unas 4 veces, la onda sería totalmente reflejada y supondría una reducción de diámetro entorno al 50 % o una reducción realmente muy significativa de la resistencia a compresión del pilote.

En referencia al mínimo espesor del cambio de impedancia detectable, Van Weele en 1993 sugiere que la onda que se produce utilizando un martillo de mano, como el que se utiliza para estos ensayos, tiene una longitud de onda de unos 3 a 4 m por lo que no se podrían detectar con claridad defectos que tengan espesores menores de 0,8 a 1,0 m. Esto es muy importante ya que en el caso de detectarse defectos, sus espesores serían significativos, así como las variaciones de impedancia.

Ante lo expuesto en los párrafos anteriores, las técnicas de Eco e Impedancia Mecánica no son capaces 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. Sin embargo, al contrario que la Transparencia Sónica si se utiliza la técnica de la Impedancia Mecánica, sí que se puede obtener información sobre la



CEDEX

respuesta pilote-suelo en el entorno de la cabeza del pilote, con los parámetros de movilidad y rigidez, por comparación con pilotes de características parecidas en entornos geotécnicos similares.

### **3.7.3. Reacción e interacción pilote-suelo de cimentación**

La reacción pilote-suelo con el amortiguamiento y las variaciones en profundidad de las características del terreno, complican todavía más la interpretación de los cambios de impedancia en el pilote en sí, y por tanto de la integridad del pilote ensayado.

Con respecto a la reacción pilote-suelo se debe tener en cuenta que variaciones en el módulo de cizalla del terreno del orden de 1:2,5 provocarían reflexiones parciales muy significativas y que se superponen a la señal propia del pilote, y relaciones en el módulo de cizalla de 1:5 provocarían reflexiones totales por lo que no podría evaluarse el estado del pilote.

En los 3 ejemplos siguientes se han simulado tres curvas de Impedancia Mecánica para el mismo pilote en distintas condiciones geotécnicas.

En el ejemplo 1 es la respuesta de un pilote de 10 m de longitud y diámetro 500 mm en un terreno homogéneo en el que se observan muy bien las resonancias correspondientes a 10 m.

En el ejemplo 2, para el mismo pilote se ha introducido una capa de 1m de espesor a 5m de profundidad con 2,5 veces la velocidad de propagación de las ondas s que el resto del terreno (más rígida). Esta capa ya interfiere en la señal.

Por último en el ejemplo 3, la capa intermedia tiene una velocidad de propagación de las ondas de cizalla de 1:5 veces, que como se ve oculta completamente el fondo del pilote y provoca las resonancias significativas.

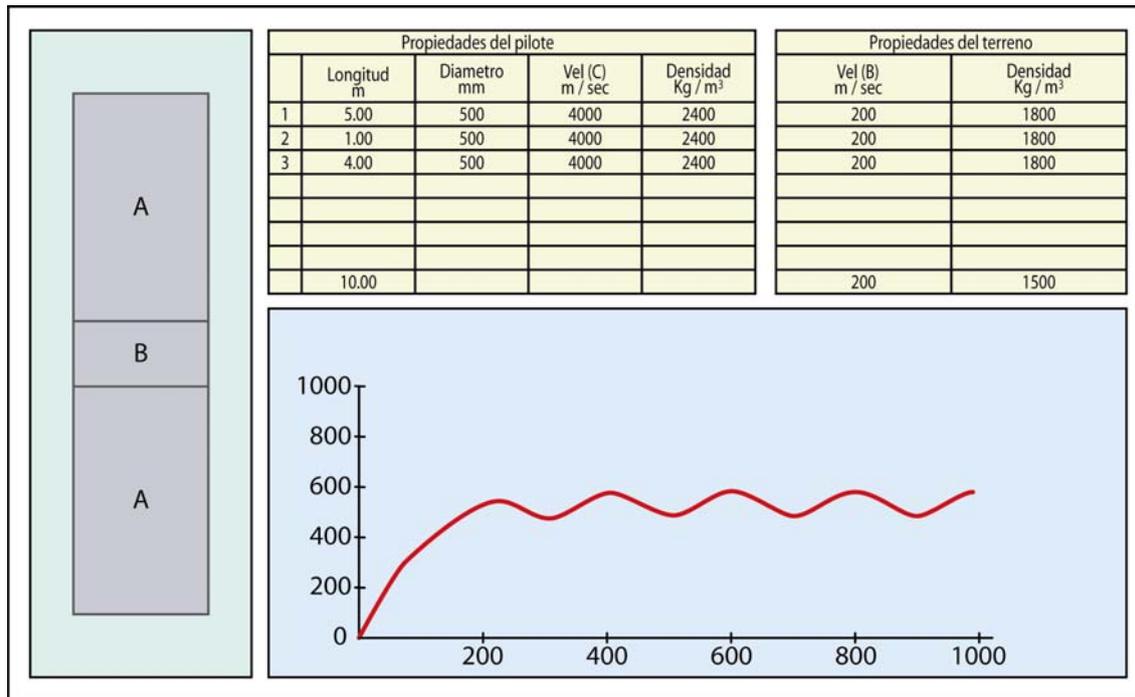


FIG. 3.34. PILOTE EN TERRENO HOMOGÉNEO (EJEMPLO 1)

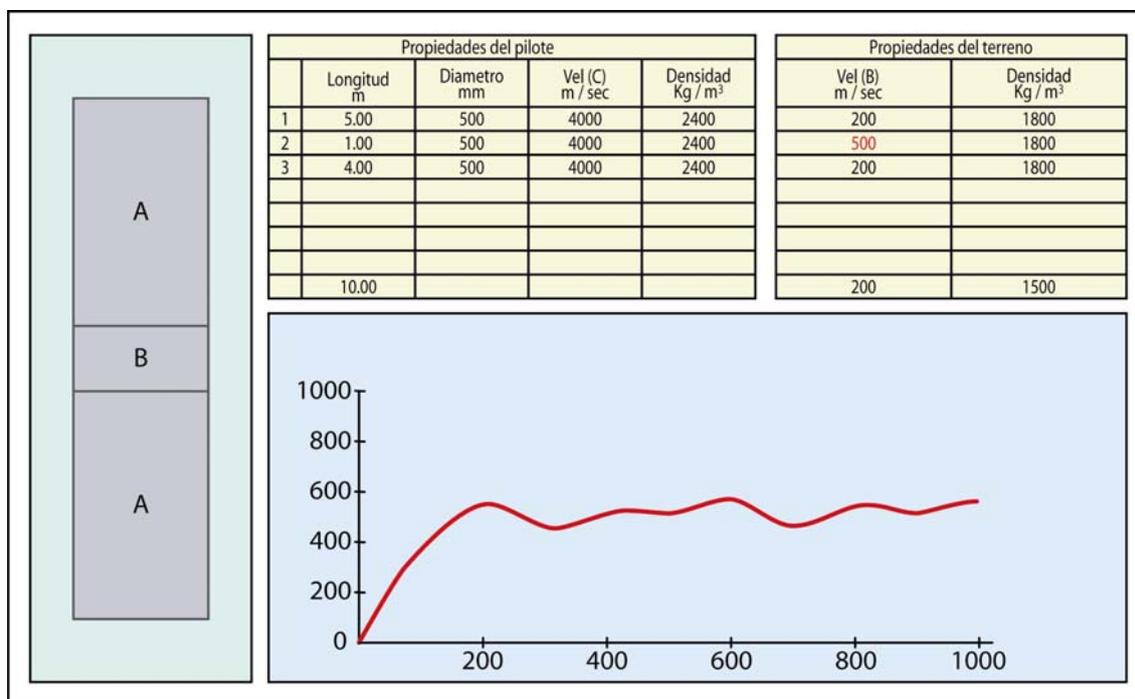


FIG. 3.35.- PILOTE EN TERRENO CON NIVEL RÍGIDO A 5 m (EJEMPLO 2)

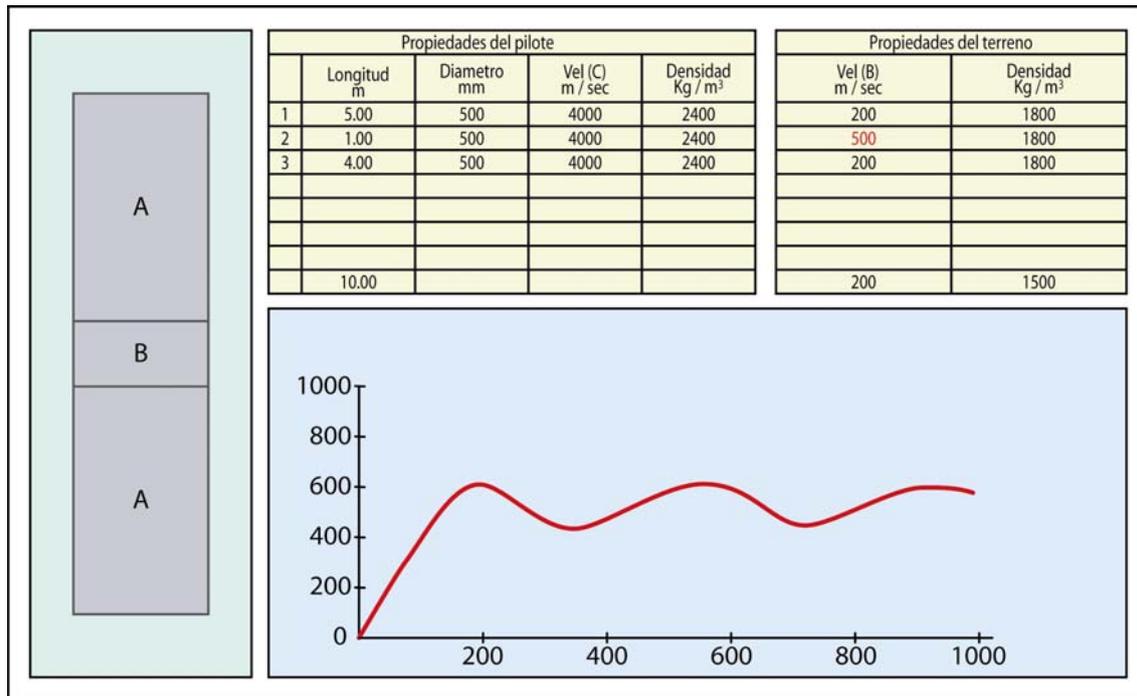


FIG. 3.36.- PILOTE EN TERRENO CON NIVEL MUY RÍGIDO A 5 m (EJEMPLO 3)

Teniendo en cuenta estos datos sobre la reacción pilote-suelo que se han presentado, se deben considerar condiciones muy malas para la interpretación de estos ensayos si se quiere alcanzar la punta, cuando se ensayan pilotes en terrenos blandos que van a empotrar en un material más rígido “n” diámetros. El contacto entre estos dos tipos de terreno enmascarará la punta del pilote pudiendo ocultarla. Sin embargo se obtendrán datos del empotramiento en el terreno más competente.

### 3.7.4. Defectos próximos a la cabeza

Si los defectos están muy próximos a la cabeza de los pilotes habrá que considerar que la longitud de onda que generamos es de unos 3-4 m como se ha indicado anteriormente. Por tanto puede ser que no sea posible detectarlos con el ensayo de Eco en el tiempo. En los defectos en cabeza hay que hacer un análisis de movilidad y rigidez utilizando la técnica de Impedancia Mecánica ya que como se conoce, son parámetros que dan información de la parte alta del pilote.

### **3.7.5. Detección de la punta**

La punta del pilote no podrá ser observada claramente con ninguna de las dos técnicas si los pilotes están empotrados en una roca compacta que tenga características similares de impedancia acústica como el hormigón. Por tanto estas técnicas no se pueden utilizar para analizar si se ha limpiado la punta del pilote adecuadamente y sería necesario utilizar Transparencia Sónica. El Eco y la Impedancia Mecánica sin embargo, sí que permiten analizar si el elemento se encuentra en una situación de empotramiento en punta o de pilote libre.

### **3.7.6. Caracterización de la calidad del hormigón**

Con el Eco y la Impedancia Mecánica las variaciones en la calidad del hormigón se podrán detectar si éstas provocan variaciones de densidad, contenido en agua, cemento, etc., significativas, y siempre teniendo en cuenta los conceptos de variación de impedancia que se han tratado. El nivel de la admitancia real determinado en la curva de movilidad se puede comparar con el nivel teórico que corresponde a la sección y a la calidad del hormigón del pilote.

### **3.8. Clasificación base de las curvas de eco e impedancia mecánica**

Con las técnicas de Eco e Impedancia Mecánica el análisis de resultados obtenido será sencillo si el pilote no tiene variaciones de sección o sencillamente está roto y será más complicado en pilotes con mucha variación de sección o de impedancia.

El análisis de resultados es la parte más compleja de los ensayos no destructivos en general. Es necesario que se realice por técnicos con una alta cualificación.

Además de ser apropiado el análisis que se efectúe, debe realizarse en un plazo que no entorpezca los tajos en obra por lo que será conveniente en la medida de lo posible redactar en obra al menos una nota previa que indique si se observan defectos significativos que requieran un análisis posterior.



El análisis de defectos se ha analizado en el texto. Sin embargo siempre quedan incertidumbres cuando por ejemplo la respuesta de la punta no es buena (de suficiente amplitud) o no se observa por respuestas intermedias el estado global del pilote.

Como primera aproximación CIRIA propone una clasificación de señales obtenidas con Eco o Impedancia Mecánica que atiende a 3 tipos y que parece una primera aproximación muy interesante al problema de la interpretación.

### 3.8.1. Señal tipo 0. No hay reflectores

No hay ecos en la curva de tiempos en el ensayo de Eco ni resonancias en la curva de movilidad.

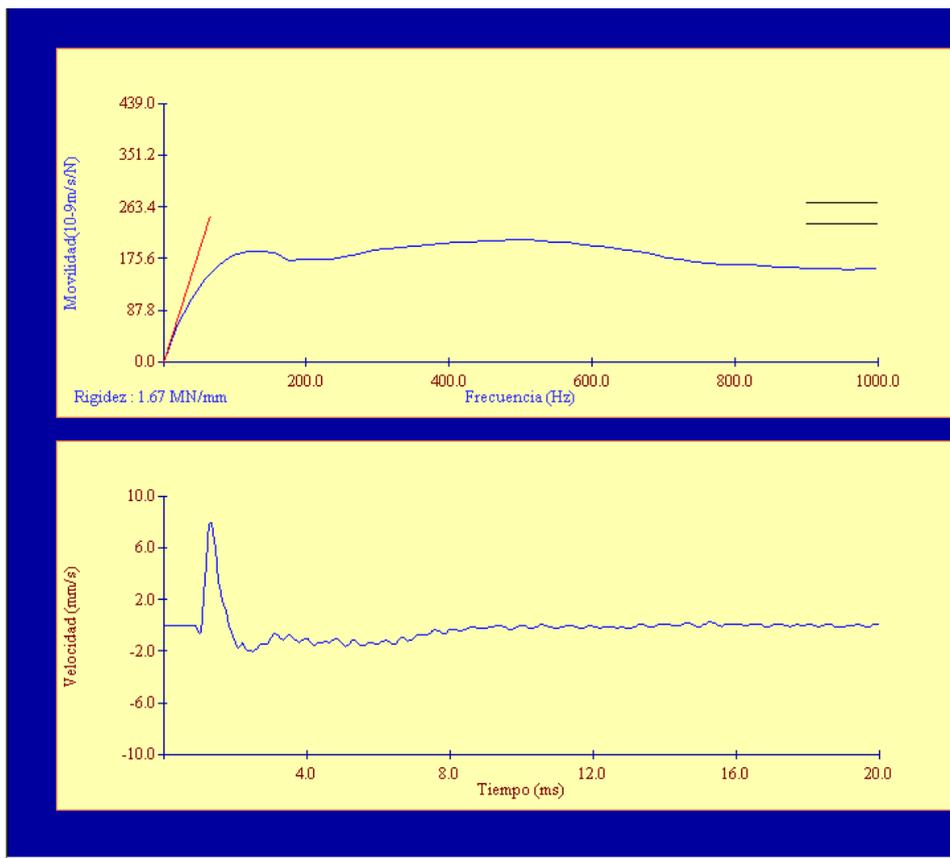


FIG. 3.37.- CURVAS DE MOVILIDAD Y ECO TIPO 0

Sería el caso de terrenos rígidos que provocan un amortiguamiento importantísimo de la señal, que incluso no puede solucionarse ni con amplificaciones exponenciales.

Aunque parezca una paradoja, lo bueno es que no hay cambios de impedancia en el pilote, lo que indica que no se detectan irregularidades hasta la profundidad de investigación del equipo. Será necesario si es posible, comparar y extraer conclusiones de pilotes similares, en entornos geotécnicos parecidos.

Para este tipo de señal la técnica de Impedancia Mecánica permite estimar la rigidez y el nivel de admitancia. La comparación de estos datos con los valores obtenidos en pilotes próximos de la misma obra aporta información para caracterizar el estado de los pilotes.

En el informe sencillamente se debería indicar que no se observa ningún reflector o resonancia justificándolo.

En el caso de la Impedancia Mecánica habrá que explotar al máximo los datos de rigidez y admitancia característica que proporciona el ensayo para intentar eludir la falta de reflectores.

### **3.8.2. Señal tipo 1. Sólo una respuesta y buena**

En el informe se deberá indicar si corresponde al fondo del pilote al coincidir la profundidad con la teórica del pilote o si se observa una reducción de sección o cambio de impedancia que impide detectar el régimen vibratorio del fondo del pilote. En este caso es necesario indicar si el cambio de impedancia es de aumento o disminución, tanto si corresponde a la punta del pilote como a una posición intermedia.

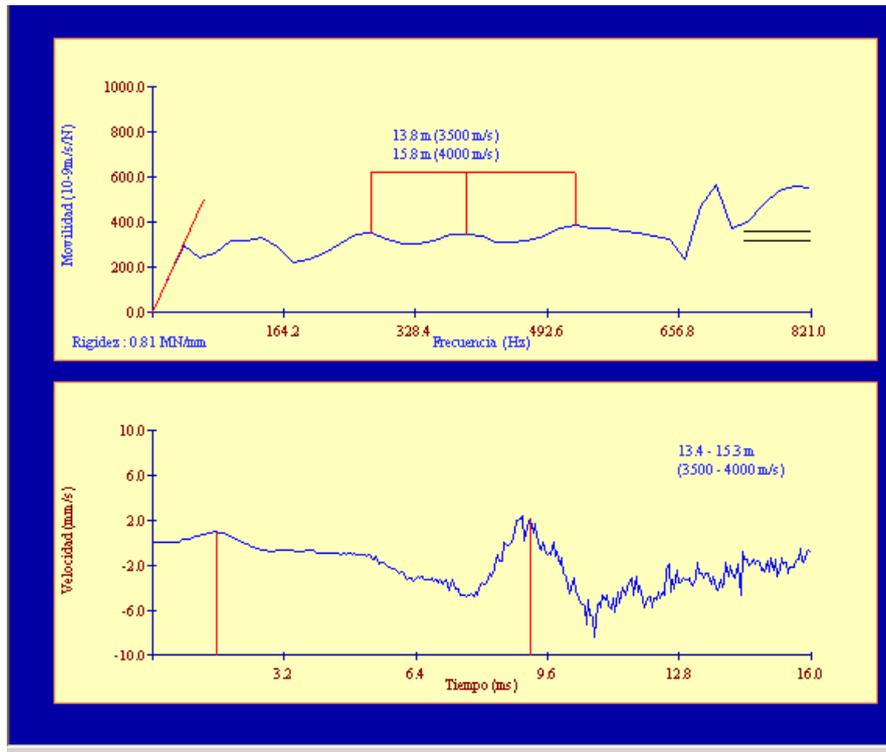


FIG.3.38.- CURVAS DE MOVILIDAD Y ECO TIPO 1

### 3.8.3. Señal tipo 2. Varias respuestas y una más significativa

Las señales de tipo 2 son las que presentan más problemas de interpretación. En especial se plantean dos situaciones, una que se vea el fondo del pilote y al menos se puede evaluar la longitud total y otra en la que esto no sea posible porque las incidencias intermedias sean muy significativas.

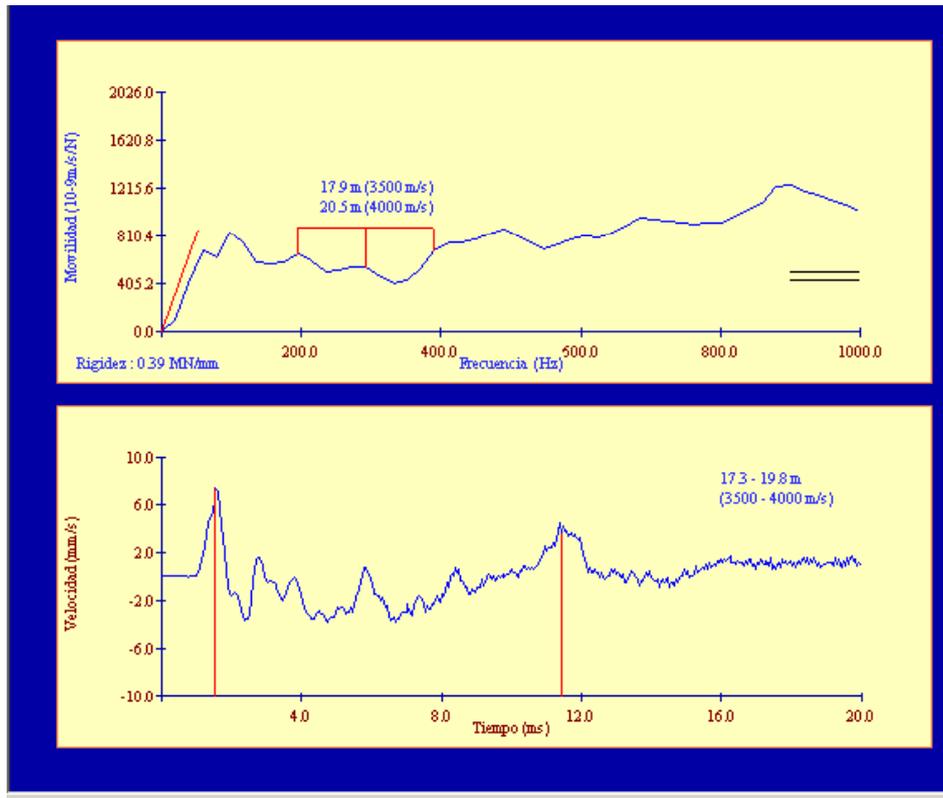


FIG. 3.39.- CURVAS DE MOVILIDAD Y ECO TIPO 2

### 3.9. Análisis combinado y asistido de señales de eco e impedancia mecánica

En el momento actual el análisis combinado de la curva de eco en el tiempo y la curva de movilidad, tras un tratamiento numérico, permite obtener una “representación gráfica” del pilote que se denomina “PERFIL DE IMPEDANCIA” y que ya incorporan muchos equipos de medida. El resultado de este análisis es una representación visual de la geometría vertical del pilote.



CEDEX

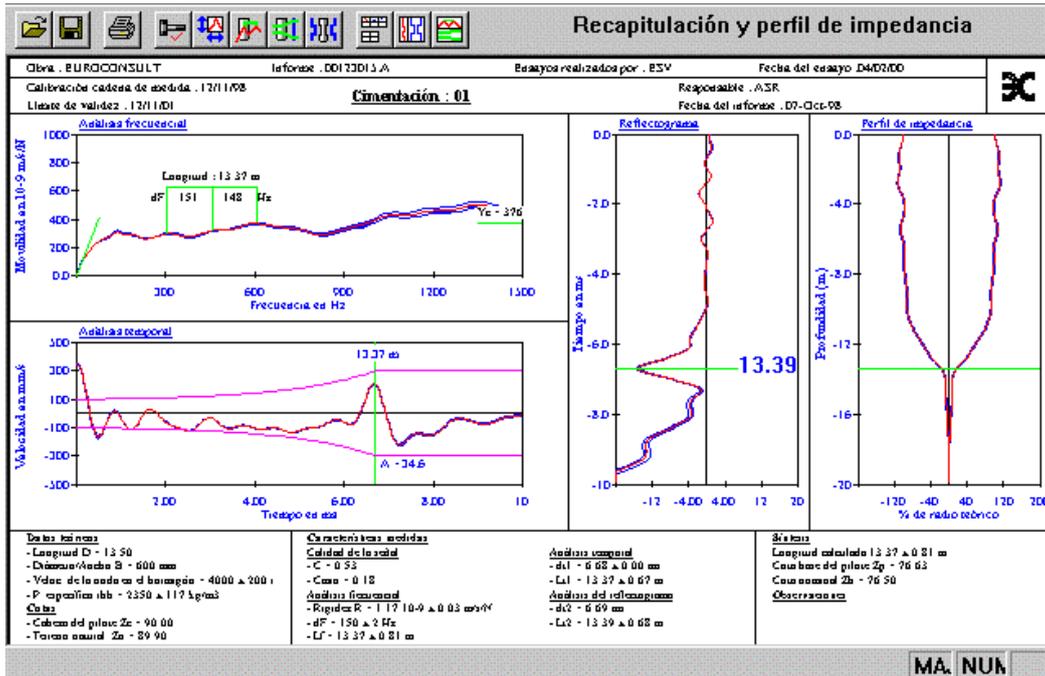


FIG. 3.40.- GRÁFICO CON CURVA DE ECO, IMPEDANCIA MECÁNICA Y PERFIL DE IMPEDANCIA

Este tipo de análisis, que pretende eliminar interpretaciones subjetivas de las curvas de Eco e Impedancia, requiere que las señales obtenidas sean de gran calidad y los equipos de tratamiento numérico sean muy potentes. En cierto sentido estos tratamientos asisten al análisis, pero como tal se deben tomar como asistentes al análisis y no un fin en si mismos.

Anteriormente se ha insistido en el gran número de causas que pueden provocar variaciones de impedancia por lo que un análisis totalmente automatizado es bastante complejo. La norma ASTM considera que el análisis de la integridad del pilote, ya sea en el tiempo o en frecuencia, proporciona una evaluación cualitativa, por lo que las técnicas de análisis asistido deben de tomarse con cautela. Lógicamente realizarán un mejor análisis en condiciones de pilotes de pequeña esbeltez con reflexiones claras en terrenos blandos homogéneos que en condiciones más complejas.

El interés de los métodos de análisis asistido que realizan una representación del reflectograma, utilizando la impedancia característica de una sección infinitesimal del pilote, es que facilitan o colaboran a la interpretación. También persiguen poder evaluar por ejemplo, el porcen-



taje de sección afectada por una heterogeneidad. Realmente deben responder cuando se producen reducciones de sección o heterogeneidades, a qué cantidad de energía se transmite a la punta y qué parte se refleja hacia la cabeza.

Estas técnicas de análisis tampoco proporcionan información sobre la posición lateral de los defectos. Con las nuevas técnicas de interpretación una anomalía podrá evaluarse, como máximo, como un porcentaje de reducción de sección sin indicación de si es central o periférica, si se trata de una inclusión, de un deslavado, etc.

### **3.10. Ventajas y limitaciones de las técnicas de eco e impedancia mecánica**

Entre las ventajas que presentan los ensayos de Eco e Impedancia Mecánica, al contrario que la Transparencia Sónica, está la de que no requieren una instrumentación previa del pilote. Sólo se precisa que el pilote esté descabezado y que se prepare adecuadamente la cabeza en función del ensayo a realizar. Si los pilotes están bien preparados para realizar el ensayo, se pueden auscultar un gran número de pilotes en un día. El ensayo se puede realizar tanto en pilotes perforados como en los prefabricados e hincados, siempre que la geometría sea cilíndrica o prismática y se cumplen las condiciones geométricas definidas anteriormente (esbeltez y diámetro máximo).

Si el registro es claro y se puede comparar la polaridad de la onda reflejada con la de la onda inicial, en el caso del Eco, o en la movilidad analizando la curva, se puede distinguir si la punta está empotrada o no, o si el reflejo lo produce una anomalía que aumenta o reduce la impedancia. Estos métodos permiten detectar ensanchamientos o empotramientos, proporcionando información sobre la reacción con el terreno.

En determinados casos permiten la realización de ensayos de integridad incluso en pilas-pilote.

Como primera limitación estaría la que marca la norma ASTM y es que el análisis que se hace en oficina puede ser dificultoso y requerir el uso de simulaciones, análisis de señal, etc. Como



**CEDEX**

se ha indicado a lo largo del texto hay que intentar evitar esta limitación realizando un primer análisis si es posible en obra.

Los ensayos de Eco e Impedancia Mecánica son generalmente complicados de interpretar y requieren en obra y gabinete personal especializado y experimentado. Los métodos que asisten la interpretación y datos adicionales del ensayo de Impedancia Mecánica como la rigidez dinámica y la admitancia característica son una ayuda a la interpretación, que puede confirmar o al menos permite despreciar unos resultados de ensayo poco definidos.

Si existiesen varias anomalías a distintas profundidades, es difícil determinar la posición de las anomalías más profundas incluso con técnicas asistidas.

La interpretación de los ensayos necesita suponer una velocidad de propagación de las ondas en un cilindro de hormigón. Al variar esta velocidad entre 3500 y 4000 m/s, la incertidumbre en la medida de distancias es del orden de un 10%. No se puede determinar el estado de la punta del pilote en cuanto a la limpieza del fondo de excavación y no proporciona ninguna información sobre la posición lateral de las anomalías observadas.

Si en el terreno existen capas rígidas intercaladas, se pueden producir rebotes de la señal en estas capas dificultando la interpretación e incluso en algunos casos ocultando la respuesta del fondo del pilote.

Dado que la interpretación es una de las limitaciones, es necesario solventarla lo máximo posible analizando, por ejemplo, la curva de Eco en tiempo y el registro de movilidad conjuntamente para alcanzar una interpretación común.

Realmente, incluso con estas limitaciones que hace que sean técnicas que no detectan todas las imperfecciones, son una buena herramienta para detectar defectos significativos y comprobar la longitud teórica de los pilotes de forma sencilla.

Las principales diferencias, entre los métodos de Impedancia Mecánica y Eco que se han descrito son las que se indican a continuación:



TABLA 3.1.- DIFERENCIAS, ENTRE LOS MÉTODOS DE IMPEDANCIA MECÁNICA Y ECO

Método	ECO	IMPEDANCIA MECÁNICA
Martillo instrumentado	NO	SI
Dominio de base para la interpretación de resultados	Tiempo	Frecuencia
Cálculo de la L del pilote	$L = \frac{V t}{2}$	$L = \frac{V}{2\Delta f}$
Normativa de referencia	ASTM D5882-00 NF-P94-160-2 (94)	ASTM D5882-00 NF-P94-160-4 (94)
Preparación de la cabeza del pilote	Para sensores de Velocidad/Aceleración	Para sensores de Velocidad/Aceleración y Fuerza
Cálculo de la rigidez dinámica	NO	SI
Análisis de la movilidad	NO	SI

### **3.11. Casos especiales. pilotes con el encepado ejecutado**

En muchas ocasiones surge la pregunta de si se pueden realizar ensayos de Eco o de Impedancia Mecánica cuando ya están ejecutados en obra los encepados y/o vigas de atado porque se han observado defectos en los trabajos de cimentación. La respuesta normalmente es que, no se han obtenido buenas señales que sean interpretables, al provocarse reflexiones y amortiguamientos intermedios en estos elementos instalados sobre la cabeza de los pilotes (algunas referencias indican que se han realizado ensayos de Eco realizando una entalladura en el pilote para colocar el geófono y han dado buenos resultados).

A continuación se muestran dos técnicas que evitan esta situación y sirven también para la investigación de pilotes con patologías. Estas técnicas son conocidas comúnmente como Sísmica Paralela y Ultrasismicidad.



**CEDEX**

Más allá de las denominaciones estas técnicas son muy importantes al permitir ensayar casos especiales del Patrimonio Histórico, patologías, defectos, etc... además sirven de complemento a las técnicas de Eco e Impedancia Mecánica como investigación de heterogeneidades que se hayan detectado previamente.

### **3.11.1. Sísmica paralela**

El ensayo de Sísmica Paralela se emplea para reconocer pilotes, pozos, estribos, etc., en aquellas situaciones en los que el acceso a la parte superior no es posible o ya se han hormigonado los encepados.

Para ejecutar el ensayo hay que realizar una perforación paralela al pilote a ensayar, a una distancia próxima al pilote (del orden de 1 m.) y hasta una profundidad que sobrepase ampliamente la esperada en el pilote. En el taladro se instala un tubo de PVC con un tapón en el fondo. Se sellan las paredes entre el tubo y el taladro con un mortero de cemento para asegurar un buen contacto entre el tubo y el terreno. Dependiendo de la sonda que se utilice, el tubo se puede rellenar de agua limpia para asegurar un buen acoplamiento con la sonda receptora.

En el tubo se introduce una sonda receptora que suele ser un geófono, hidrófono o una sonda piezo-eléctrica. La sonda se va izando a incrementos de profundidad conocidos que suelen ser inferiores a 0,5 m. A cada profundidad de la sonda se provoca, con el golpe de un martillo realizado lo más cerca de la cabeza del pilote, una señal que se transmite por el pilote al terreno y a través de éste a la sonda receptora. A cada profundidad se registra el tren de ondas que llega a la sonda y se mide el tiempo de su llegada. Se dibuja el gráfico de tiempos de llegada en función de la profundidad a la que se encuentra la sonda desde el punto de impacto en el hormigón.

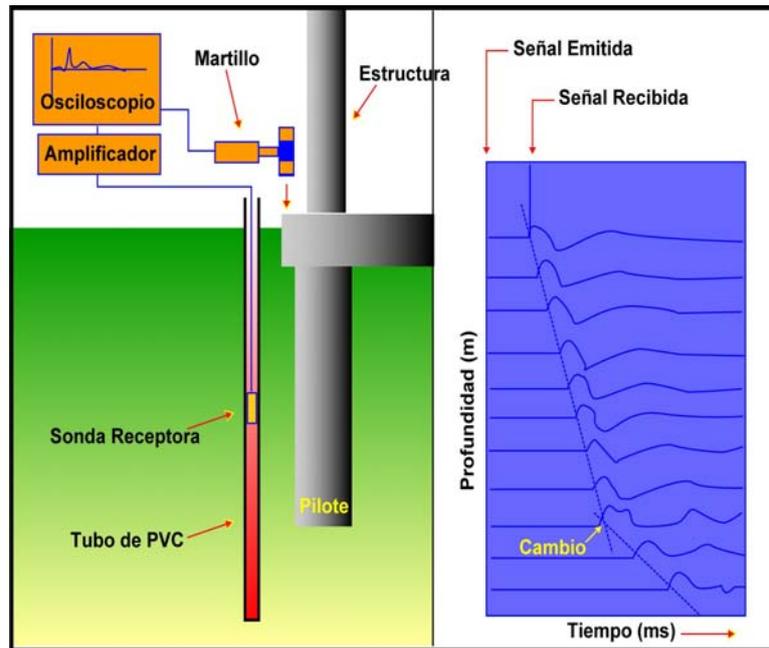


FIG. 3.41.- ESQUEMA DEL PRINCIPIO DE SISMICA PARALELA

A pequeñas profundidades de la sonda, la trayectoria que sigue la primera llegada de la onda a la sonda es similar. La onda recorre una parte del pilote y después se transmite por el terreno hasta la sonda. El tiempo que tarda la onda en transmitirse por el terreno es constante y la diferencia de tiempo en las distintas profundidades viene causada por el incremento de distancia que se recorre en el hormigón. A partir de una cierta profundidad de la sonda el espacio recorrido por la onda en el pilote es constante (su longitud) y la parte recorrida en el terreno empieza a aumentar de forma hiperbólica con la profundidad.

En la hipótesis de que el suelo sea homogéneo y que el taladro sea paralelo al pilote, la primera parte de la curva de tiempos de primeras llegadas con la profundidad de la sonda es una recta y la parte final es una hipérbola de la cuál se puede estimar su asíntota. La intersección de esta recta con la asíntota a la hipérbola determina la distancia desde el punto de impacto hasta la base del pilote. Este ensayo tiene incluso referencia normativa para pilotes en Francia.



CEDEX

### 3.11.2. Ensayos de ultrasismicidad

El método ultrasísmico es una aplicación directa del procesamiento geofísico desarrollado en programas de auscultación de cimentaciones de puentes en servicio. En EEUU el método se emplea cuando hay dificultades al ensayar un elemento con la técnica del Eco o de la Impedancia Mecánica porque no es cilíndrico (pilote) o en subestructuras circulares complejas. El método ultrasísmico es una técnica de reflexión sónica que usa las técnicas digitales de procesamiento geofísico para analizar la propagación de las ondas de compresión generadas cuando se reflejan en los límites de la cimentación de la subestructura por cambios de impedancia.

El principio es el mismo que se utiliza en las técnicas del Eco o de la Impedancia Mecánica, pero requiere el registro y toma de datos de varios canales de entrada.



FIG. 3.42.- PANTALLA DE PILOTES CONVIGA DE ATADO EN CABEZA

En el método ultrasísmico las ondas de compresión en su primera llegada a los sensores y en las múltiples reflexiones que se producen son analizadas para predecir la profundidad que se desconoce de la cimentación. Se utiliza para condiciones especiales de ensayo como las que se muestran en la figura 3.42.

En este método, la pila, el encepado o el estribo se golpea en la parte superior o en un lateral (ya sea horizontal o verticalmente) y el movimiento ondulatorio resultante se registra a intervalos regulares hacia el fondo del elemento auscultado. Normalmente se utilizan aceleróme-

tros o geófonos de 3 componentes con objeto de analizar todos los movimientos producidos en la estructura con el impacto provocado. La generación de un perfil vertical puede realizarse tanto en elementos de forma cilíndrica (pozos o pilotes) como en elementos de tipo pantalla, estribo, zapata, etc.

La dificultad de la técnica como en todas las no destructivas radica sobre todo en el procesamiento de señal y la interpretación que no es de un solo registro. Esta técnica no es tan sencilla de aplicar como el Eco y la Impedancia y tampoco resuelve todos los problemas de auscultación debiéndose tomar con precaución.

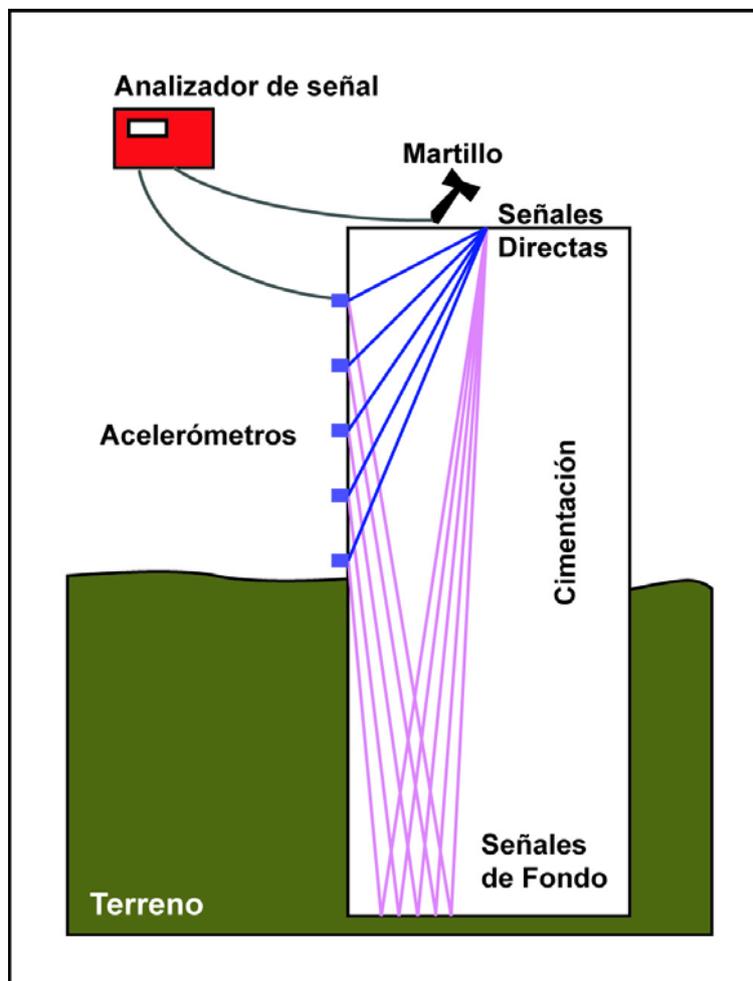


FIG. 3.43.- ESQUEMA DEL PRINCIPIO DE LA ULTRASISMICIDAD



CEDEX

### **3.12. Informe de resultados**

Tanto los informes de Eco como los de Impedancia Mecánica deben tener una presentación de resultados y análisis de integridad, proponiendo investigaciones complementarias si fuera necesario. El informe, además de la definición del método empleado y las curvas, en las que se hayan marcado las señales más significativas desde el punto de vista del análisis de integridad, deberá contener:

- Tipo de técnica empleada método de análisis ya que como se ha visto presentan diferencias significativas.
- Longitud auscultada más profunda, que será la longitud del pilote si no hay señales intermedias. En caso de no haber marcado ninguna profundidad se deberá justificar la razón.
- Si la longitud marcada más profunda corresponde a un ensanchamiento o bulbo, estrechamiento o estricción, empotramiento en el terreno o fondo del pilote, al menos se deberá indicar si se trata de un aumento o disminución de impedancia.
- Si se dispone o no de los partes de perforación, incidencias durante la ejecución de los pilotes y de alguna información geotécnica.
- Si las profundidades son intermedias y no el fondo del pilote, se deberá incluir una estimación de la magnitud de la variación de impedancia. Si no es posible, al menos se destacará si deja pasar la señal o no.
- Si el ensayo realizado es el de Impedancia Mecánica se realizarán indicaciones y el análisis pormenorizado de los valores de la rigidez y admitancia en comparación con pilotes similares y en entornos geotécnicos análogos.
- El ensayo de integridad debe ser un elemento de inspección que si es necesario se tendrá que completar con investigaciones complementarias que se indicarán en el infor-



CEDEX

me. No es un árbitro final para decir si está bien o mal un pilote, pero no debe sembrar incertidumbres.

Los gráficos deberán ser muy claros con buena indicación de escalas, traducidos magnitudes físicas como longitud del pilote.

De las conclusiones no se puede extraer directamente que pequeñas variaciones de impedancia serán fatales para el comportamiento del pilote. El ingeniero deberá juzgar la aceptabilidad de los pilotes con heterogeneidades, considerando otros factores como la redistribución de cargas en pilotes adyacentes, transferencias de cargas al terreno por encima de la heterogeneidad, coeficientes de seguridad adoptados, requerimientos reales de carga de la estructura sobre los pilotes, etc. A estas técnicas no se les debería pedir más que una interpretación de las dimensiones globales del elemento, de la continuidad del pilote y de la consistencia de los materiales. Por supuesto estas técnicas no aportan información sobre la capacidad portante del pilote y sería arriesgado obtener conclusiones sobre este aspecto.



CEDEX

## BIBLIOGRAFÍA

- AFNOR. "Fondations profondes pour le bâtiment". P11-212, "DTU 13.2, 1992.
- AFNOR. "Sols: Reconnaissance et essais. Essai statique de pieu isolé sous compression axiale". NF P 94-150, 1991.
- AFNOR. "Sols: reconnaissance et essais. Auscultation d'un élément de fondation. Partie 1: Méthode par transparence". NF P 94-160-1, 1993.
- AFNOR. "Sols: reconnaissance et essais. Auscultation d'un élément de fondation. PARTIE 2: Méthode par réflexion". NF P94-160-2 , 1994.
- AFNOR. "Sols: reconnaissance et essais. Auscultation d'un élément de fondation PARTIE 4: Méthode par impédance". NF P94-160-4, 1994.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. "Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing", ASTM D 6760-02.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. "Standard Test Method for Low Integrity Testing of Piles", ASTM D 5882-00.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. "Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load", ASTM D 1143-81 (1994).
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. "Test Method for High Strain Dynamic Testing of Piles". ASTM D 4945- 00.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE), "Design of Pile Foundations". Nueva York, 1993.
- AMIR, J. "Single-tube ultrasonic testing of Pile Integrity", Proc. of the International Deep Foundations Congress 2002. ASCE Geo-Institute.
- ARNAU RODRÍGUEZ, J.M., FERNÁNDEZ TADEO, C. "Ensayos de integridad de pilotes en la construcción de la Autopista A-19, tramo Sant Pol de Mar". Symposium Nacional sobre Control de Calidad de Materiales de Hormigón Armado. Madrid, 1993.
- ARNAU RODRÍGUEZ, J.M., FERNÁNDEZ TADEO, C. y CORREA LLOREDA, L. "Ensayo de control de integridad en pilotes". Cimbra, enero 1993.



- ARROYO, M. y SAINZ DE BARANDA, B. "Pruebas de carga dinámica y estática sobre un pilote de extracción (Ø650 mm): comparación de resultados". Boletín Soc. Esp. Mecánica del Suelo, 1997.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (AENOR) "Ejecución de trabajos especiales de geotecnia. Pilotes perforados", norma UNE-EN 1536, julio 2000.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (AENOR) "Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales", norma española experimental UNE-ENV 1997-1, marzo 1999.
- AUSTRALIAN STANDARD AS2159-1995, " Piling - Design and installation".
- BAKER ET AL. Use of nondestructive testing to evaluate defects in drilled shafts: Results of FHWA research. TRB, 1991.
- BENATOV, B.. FARACO, C. y NOUET, A.. Aplicación de métodos no destructivos a los controles de cimientos profundos en España. Revista Ingenieria Civil, 1979
- BLYTH S.E.R.C. PROJECT. Piles formed with built anomalies. Doc Testconsult, 1985.
- BRIAUD, J., BALLOUZ, M., NASR, G. "Defect and length predictions by NDT methods for nine bored piles", Proc. of the International Deep Foundations Congress 2002. ASCE Geo-Institute.
- CHANDRA PRAKASH, RASTOGI, P.C., SHARMA, A.K. "Assessment of shape and quality of bored concrete piles by integrity testing". Indian Geotechnical Journal, 1993.
- CHERNAUSKAS, L., PAIKOWSKY, G., "Defect Detection and Examination of Large Drilled Shafts Using a New Cross-Hole Sonic Logging System", GeoInstitute / ASCE Speciality Conference, University of Massachusetts, 2000.
- CIRIA Report 144. Integrity testing in piling practice, 1997
- DAVIS AND GUILLERMAIN. La vibration des pieux. Interprétations Géotechniques, 1978.
- DAVIS, ALLEN G. The Development of non-destructive small-strain methods for testing deep foundations. A review. TRB, 1991.



CEDEX

- DIRECCION GENERAL DE CARRETERAS del Ministerio de Fomento. PG3 art. 670 "Cimentaciones por pilotes hincados a percusión". Orden FOM/1382/2002, de 16 de mayo. BOE 11-6-02
- DIRECCION GENERAL DE CARRETERAS del Ministerio de Fomento. PG3 art. 671 "Cimentaciones por pilotes de hormigón armado moldeados in situ". Orden FOM/1382/2002, de 16 de mayo. BOE 11-6-02.
- ENGLAND, M. "A guide to low-strain integrity testing". Cementation Piling and Foundations Ltd.
- FELLENIUS, B. "Guidelines for the interpretation and analysis of the Static Loading Test", Deep Foundations Institute, 1990.
- FERNÁNDEZ TADEO, C. "Técnicas modernas para el ensayo de pilotes y cimentaciones profundas". Cuaderns d'estructures, Barcelona maig 2000. Associació de Consultors d'Estructures.
- FERNÁNDEZ TADEO, C. y ARNAU RODRÍGUEZ, J.M. "Ensayo de integridad estructural de pilotes utilizando sistema portátil de gran rendimiento". IV Jornadas Técnicas de Laboratorios Acreditados. A.N.L. Sevilla, 1992.
- FERNÁNDEZ TADEO, C. y TÉLLEZ GARCÍA, E. "Los ensayos de integridad estructural de pilotes. Situación actual en España y perspectivas". Simposio de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica, septiembre 2000.
- FINNO, R. y CHAMPY, P "Cross-Hole Sonic Logging Evaluation of Drilled Shafts at the Northwestern University National Geotechnical Experimentation Site" Final Report to the Infrastructure Technology Institute, Sept. 1997.
- FINNO, R.J., GASSMAN, S.L., OSBORN, P.W. "Non-Destructive Evaluation of a Deep Foundation Test Section at the Northwestern University National Geotechnical Experimentation Site, June 1997". Northwestern University, Evanston, Illinois. Report Submitted to the Federal Highway Administration.
- FLEMING, W.G.K., WELTMAN, A.J., RANDOLPH, M.F., ELSON, W.K. "Piling Engineering". Blakie, Londres, 1992.
- HIRANY, A., KULHAWY, F., "On the interpretation of drilled foundation load test results", Proc. of the International Deep Foundations Congress 2002. ASCE Geotechnical Institute.



CEDEX

- HOLEYMAN, A.E. "Keynote Lecture: Technology of pile dynamic testing". Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. La Haya, 1992.
- INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS. "Specification for piling". Thomas Telford, Londres, 1988.
- JIMÉNEZ SALAS, J.A., y otros "Geotecnia y Cimientos III". Madrid, 1980.
- LCPC-SETRA. "Les pieux fores. Recueil des règles de l'art", 1978.
- O'NEILL, MICHEL W. Construction Practices and Defects in Drilled Shafts. TRB 1991.
- PAIKOWSKY, G., CHERNAUSKAS, L., HART, L., DELY, C., DIMILLIO, A., "Examination of a New Cross-Hole Sonic Logging System for Integrity testing of Drilled Shafts", Proc. of the Sixth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. Sao Paulo, Brasil, 2000.
- PAQUET, J. Contrôle non destructif des pieux en beton Carottage Sonique et méthode de l'impédance mécanique, marzo 1976.
- PAQUET, J. Contrôle des pieux par carottage sonique, 1969.
- PAQUET, J. Pile integrity testing/the CEBTP reflectogram. Piling Europe, 1992.
- PAQUET, J. Étude vibratoire des pieux en béton. Réponse Harmonique et impulsionnelle application au contrôle, mayo 1968.
- POULOS, H-G "Pile load test methods-applications and limitations". Libro homenaje a J. A. Jiménez Salas. Ministerio de Fomento, CEDEX y Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica, enero 2000.
- PUERTOS DEL ESTADO. "Recomendaciones geotécnicas para el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias". ROM 0.5-94.
- RAUSCHE, F. A comparison of Pulse Echo and Transient Response Pile Integrity Test Methods. TRB, 1991
- RAUSCHE, F., LIKINS, G., SHEN REN KUNG, "Pile integrity testing and analysis". Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. La Haya, 1992.



**CEDEX**

- REIDING, F.J. "Computer-integrated pile test equipment". Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. La Haya, 1992.
- SÁNCHEZ, F. Métodos no destructivos de control de cimentaciones profundas. Casos prácticos. IV Jornadas técnicas de Laboratorios Sevilla, 1992.
- SÁNCHEZ SALINERO, I. Métodos no destructivos para la detección de defectos de cimentaciones profundas. Revista Carreteras.
- SÁNCHEZ SALINERO, I. y SÁNCHEZ, F. Curso sobre auscultación y seguimiento de obras geotécnicas. Auscultación de pilotes. CEDEX, 1997.
- SEITZ, J.M. "Pile integrity by low strain impacts. A state-of-the-art". Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. La Haya, 1992.
- STAIN, RT. AND WILLIAMS, H. Interpretation of Sonic Coring results: A research project. Balkema Rotterdam, 1991.
- UNE-EN 1536:2000: Ejecución de trabajos especiales de geotecnia. Pilotes perforados.
- UNE-EN 1538:2000: Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Muros-pantalla.



---

**CEDEX**

# ANEJOS



---

**CEDEX**

# **ANEJO 1**

# **PARTES DE EJECUCIÓN DE PILOTES**

## Construcción de pilotes con perforación entubada, estabilizada con lodo o libre: Datos generales

Contratista \_\_\_\_\_ Tipo de pilote y método \_\_\_\_\_

Obra \_\_\_\_\_

Plano nº \_\_\_\_\_ Excavación entubada \_\_\_\_\_  
Excavación sin entubar \_\_\_\_\_  
Excavación con lodos \_\_\_\_\_

### 1 Datos del pilote

- a) Diámetro: \_\_\_\_\_ m
- b) Diámetro ext. entubado: \_\_\_\_\_ m
- c) Diámetro interior entubado: \_\_\_\_\_ m
- d) Diámetro útil perforación: \_\_\_\_\_ m
- e) Excavación bajo agua: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_
- e) Áridos (tamaño máximo) \_\_\_\_\_
- f) Relación agua/cemento A/C : \_\_\_\_\_  
A = peso agua C = peso cemento
- g) Aditivos en hormigón \_\_\_\_\_  
% del peso del cemento \_\_\_\_\_

### 2 Armadura

- Plano nº \_\_\_\_\_
- a) Colocación de jaula de armadura
    - antes del hormigonado \_\_\_\_\_
    - después del hormigonado \_\_\_\_\_
  - b) Separadores \_\_\_\_\_
    - tipo \_\_\_\_\_
    - Nº/Intervalos longitudinales \_\_\_\_/ \_\_\_\_ m
  - b) Tubos sónicos \_\_\_\_\_
    - diámetro \_\_\_\_\_
    - nº de tubos \_\_\_\_\_
      - elementos de unión \_\_\_\_\_

- h) Aditivos retardadores \_\_\_\_\_  
Tiempo de trabajabilidad ( $\geq 4h$ ) \_\_\_\_\_

### 4 Colocación del hormigón

- a) Sumergido \_\_\_\_\_  
En seco \_\_\_\_\_
- b) Método de colocación
  - tubo-tremie  $\varnothing$  \_\_\_\_\_ m
  - otro método de colocación \_\_\_\_\_
  - descripción \_\_\_\_\_
- c) Limpieza de la base del pilote \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_
- d) Medidas para separar el hormigón fresco del agua al comienzo del vertido \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

### 3 Hormigón

- a) Resistencia nominal C \_\_\_\_\_  
Consistencia (cono de Abrams):  
inicial: \_\_\_\_\_ a las 4h: \_\_\_\_\_
- b) Hormigón preparado \_\_\_\_\_  
Mezclado en obra \_\_\_\_\_
- c) Tipo de cemento \_\_\_\_\_
- d) Contenido de cemento: \_\_\_\_\_  $kg/m^3$

### 5 Tipo de lodo

- Bentonítico \_\_\_\_\_
- Polimérico \_\_\_\_\_
- Otros \_\_\_\_\_

5 Comentarios / \_\_\_\_\_  
observaciones \_\_\_\_\_

Marcar lo que proceda



**Construcción de pilotes con hélice continua: Datos generales**

Contratista \_\_\_\_\_ Tipo de pilote y método \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Obra \_\_\_\_\_ Maquinaria y equipo \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Plano nº \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**1 Datos del pilote**

- a) Longitud de la hélice \_\_\_\_\_ m
- b) Diámetro exterior hélice  $D_a$  \_\_\_\_\_ m
- c) Diámetro eje  $D_i$  \_\_\_\_\_ m
- d) Paso de la hélice \_\_\_\_\_ m
- e) Relación  $D_i/D_a$  \_\_\_\_\_ m
- f) Fondo cerrado \_\_\_\_\_ Fondo abierto \_\_\_\_\_

- e) Áridos (tamaño máximo) \_\_\_\_\_
- f) Relación agua/cemento A/C: \_\_\_\_\_  
A = peso agua C = peso cemento
- g) Aditivos en hormigón \_\_\_\_\_  
% del peso del cemento \_\_\_\_\_
- h) Aditivos retardadores \_\_\_\_\_  
Tiempo de trabajabilidad \_\_\_\_\_

**2 Armadura**

- Plano nº \_\_\_\_\_
- a) Colocación de jaula de armadura \_\_\_\_\_  
- empleo de vibrador \_\_\_\_\_
  - b) Separadores \_\_\_\_\_  
- tipo \_\_\_\_\_  
- Nº/Intervalos longitudinales \_\_\_\_/ \_\_\_\_ m

**4 Colocación del hormigón**

- a) Sumergido \_\_\_\_\_  
En seco \_\_\_\_\_
- b) Método de colocación \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**3 Hormigón**

- a) Resistencia nominal C \_\_\_\_\_  
Consistencia: Cono Abrams \_\_\_\_\_
- b) Hormigón preparado \_\_\_\_\_  
Mezclado en obra \_\_\_\_\_
- c) Tipo de cemento \_\_\_\_\_
- d) Contenido de cemento \_\_\_\_\_  $\text{kg/m}^3$

- c) Medidas para separar el hormigón fresco del agua al comienzo del vertido \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**5 Control de parámetros \_\_\_\_\_**

**6 Comentarios / observaciones** \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Marcar lo que proceda

