

EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA EN PILOTES.

**ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE LA AUSCULTACIÓN DE PILOTES POR
EL MÉTODO ULTRASÓNICO CROSS-HOLE Y EL MÉTODO DE
IMPEDANCIA MECÁNICA.**

DOCTORADO INGENIERÍA DE ESTRUCTURAS.

**SALVADOR MANSILLA VERA.
ABRIL 2008.**

ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE LA AUSCULTACIÓN DE PILOTES POR EL MÉTODO ULTRASÓNICO CROSS-HOLE Y EL MÉTODO DE IMPEDANCIA MECÁNICA.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO

En numerosas ocasiones a la hora de tomar decisiones sobre la auscultación de cimentaciones profundas se producen dilemas en lo que se refiere al método a aplicar. Estas dudas suelen producirse en obras donde se incluyen estructuras con pilotes o pantallas donde no se ha concretado a nivel de proyecto el tipo de auscultación, o incluso en el momento de la redacción del proyecto, cuando la decisión del método tiene una importante repercusión sobre el presupuesto.

Con el presente estudio pretendemos concluir algunas recomendaciones que faciliten la elección del método de auscultación. Para ello nos valdremos de algunas experiencias y analizaremos la aplicación sobre una obra real que se encuentra en ejecución en el momento de redacción de este estudio.

2. DESCRIPCIÓN DE SENDOS MÉTODOS DE AUSCULTACIÓN

2.1. PROCEDIMIENTOS.

Método ultrasónico de cross-hole

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

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

Para la realización del ensayo se precisa que en los pilotes se dejen instalados tubos para poder introducir las sondas hasta la profundidad que se quiera ensayar. Los requisitos para estos tubos son los siguientes:

- Los tubos deben ser preferentemente de acero, con diámetro mínimo de 40 mm. y preferiblemente 50 mm. Se pueden emplear tubos de PVC en pilotes cortos, pero es muy fácil que se deterioren durante el hormigonado y queden inservibles, y que no ofrezcan buena adherencia al hormigón.
- No es recomendable utilizar otros tubos de mayor diámetro para aprovechar, por ejemplo, tubos destinados a perforaciones o inyecciones en la punta del pilote, ya que la señal ultrasónica debe atravesar mayor espesor de agua en el tubo y pierde energía, lo cual reduce el alcance de la misma y dificulta el ensayo en pilotes de gran diámetro.
- Los empalmes deben realizarse con manguitos roscados, ya que las uniones soldadas pueden producir rebabas que dificulten el paso de las sondas o deterioren los cables.

- Los extremos inferiores deben cerrarse herméticamente por medio de tapones metálicos, para impedir la entrada de elementos extraños y para evitar la pérdida del agua que deben contener durante el ensayo. Los extremos superiores deben también cerrarse para evitar la caída accidental de material hasta el momento de realización del ensayo. Sobresaldrán al menos 40 cm. del hormigón del pilote.

- Los tubos deben llenarse de agua dulce limpia previamente al ensayo, y deberá comprobarse que no tienen obstrucciones, ni se producen pérdidas de agua.

- El número de tubos por pilote, según la norma francesa DTU 13.2 es el siguiente:

- o 2 tubos para diámetros de pilote inferiores o iguales a 60 cm.

- o 3 tubos para diámetros de pilote hasta 120 cm.

- o 4 tubos para diámetros de pilote superiores a 120 cm.

Los pilotes o muros pantalla estarán accesibles y sin presencia de agua. El hormigón no tendrá, en general, menos de 7 días en el momento del ensayo. Es recomendable disponer de un plano con la identificación de los pilotes, su longitud aproximada, e información sobre posibles incidencias durante su construcción. La interpretación del ensayo es realizada normalmente a posteriori una vez impresas las gráficas en gabinete.

Para cada pareja de tubos en que se haya realizado el ensayo se facilitará una gráfica del perfil ensayado, en la que figura en ordenadas la profundidad y, en abscisas, el tiempo que tardan en llegar las ondas ultrasónicas del emisor al receptor. En el caso de que uno o varios perfiles entre parejas de tubos presenten retrasos significativos o pérdidas de señal a una o varias profundidades, se dará interpretación evaluando los posibles defectos del pilote. El análisis de las gráficas obtenidas a lo largo de toda la longitud de una pareja de tubos, se examinan a partir de valores medidos en función de:

- la profundidad de sonda

- la duración de frecuencia ultrasónica t_z entre la sonda emisora y la receptora.

- la amplitud de la señal recibida A_z

Una anomalía es apreciable a partir de los dos criterios siguientes:

a) la diferencia relativa de la duración de frecuencia ultrasónica entre los dos tubos calculada a partir de la siguiente expresión:

$$[t_a - t_n] / [t_n - t_0]$$

t_0 es la duración de la propagación intermedia ligada a la cadena de medida (tiempo muerto).

t_n es la duración de frecuencia de la señal ultrasónica entre el emisor y el receptor tomando como referencia el espacio fuera de la zona singular y del término de la anomalía.

t_a es el valor medio de la duración de tiempos de transcurso ultrasónico establecido a partir de tres medidas consecutivas de la zona significativa.

La variación de la duración de frecuencia de la señal ultrasónica entre la fuente emisora y la receptora puede atribuirse a dos fenómenos:

- Una distancia no constante entre tubos (tubos no paralelos), por lo que es muy importante el seguimiento de la colocación de la ferralla.
- Un cambio de material de distinta naturaleza. La señal de amplitud esta más afectada por un posible cambio de material (terreno) que por una distancia no constante entre tubos.

b) la relación entre la amplitud de la señal recibida en la zona que presenta la singularidad y la amplitud máxima:

De aquí sabemos que: $\alpha_0 = A_a / A_{\max}$

A_a es la amplitud convencional de la señal recibida a la profundidad “a” de la zona singular, A_a es el valor de la media aritmética calculada a partir de tres medidas consecutivas, A_z de la zona singular y A_z es la amplitud convencional de la señal recibida dentro de la ventana de observación a la profundidad “z” (distancia entre el punto de recepción de la señal y el tope del tubo).

A_{\max} es el valor máximo de la amplitud de una señal recibida a todo lo largo de una pareja de tubos, tomada convencionalmente a los valores medios aritméticos de tres lecturas consecutivas de amplitud A_z .

En una auscultación de una pareja de tubos donde se detecta una singularidad, la duración t_z de frecuencia de señal ultrasónica aumenta un 20% y la amplitud de la señal A_a es inferior o igual a 0,2 de la amplitud máxima (donde la relación α_0 entre amplitudes es igual o inferior a 0,2) Es decir:

$$\frac{t_a - t_n}{t_n - t_0} \geq 0,2 \text{ y } \alpha_a \leq 0,2$$

Método de impedancia.

El método de ensayo por el procedimiento del IT-SYSTEM (impedancia mecánica) consiste en provocar una fuerza de compresión (onda de esfuerzo) mediante el golpeo con un martillo de mano en un punto de la cabeza del pilote, a la vez que se aplica en otro punto de la cabeza que no diste más de 20 cm un sensor (acelerómetro), con acoplante, que registra el impacto y la inmediata respuesta del pilote según una curva velocidad-tiempo llamada “reflectograma”.

La onda de esfuerzo generada por el golpe viaja a través del elemento ensayado hasta la base, donde se reflejará otra vez de vuelta hasta la parte superior, donde hemos situado el acelerómetro. Los reflejos no sólo son generados por la base de la estructura, sino que también por los defectos que serán la causa de que se refleje parte o toda la onda de esfuerzo.

Las reflexiones en una señal del ensayo de integridad son causadas por los cambios de impedancia y por las resistencias del suelo. Los cambios de impedancia en el eje pueden

ser debidos a variaciones en la sección transversal (estrechamientos, protuberancias, imperfecciones), y a variaciones en el módulo de Young y la densidad (heterogeneidades, material pobre). El fundamento del ensayo se basa en la teoría de propagación dimensional de las ondas de esfuerzo a través de materiales elásticos. El intervalo de tiempo "t" que transcurre entre el impacto del martillo y la señal que llega reflejada, es igual al tiempo que emplea esa onda de fuerza en viajar dos veces a lo largo del elemento a ensayar. Por lo tanto será igual a: $t = 2 L/C$
Siendo, L = Longitud del pilote y C = Velocidad

La velocidad de la onda de esfuerzo no es un valor exacto, ya que está en función de la velocidad de propagación a través de cada hormigón. Esto se puede entender analizando la siguiente fórmula, que nos permite calcular la velocidad de propagación: $C = (E/d)^{1/2}$
La diferencia en peso específico del hormigón (d) entre hormigones de alta y baja calidad, es inapreciable. Sin embargo, el Módulo de Young (E) en el hormigón de calidad es mayor que en el hormigón de baja calidad. Procesando estos reflectogramas por ordenador se pueden deducir posibles anomalías así como su localización aproximada en el pilote y la longitud total del mismo.

La fuerza aplicada en el impacto "F" y la velocidad "v" desarrollada por una partícula de masa, están relacionadas a través de la expresión: $F = Z v$ donde Z es la denominada "impedancia del pilote" y tiene por expresión:

$$Z = E \cdot A / C$$

Siendo "A" el área de la sección recta. Una disminución del área o del módulo elástico produce como reflejo una onda de tracción, mientras que un incremento de los mismos genera el reflejo de una onda de compresión. La denominación de impedancia obedece a que es una medida de la oposición del pilote a la modificación de la velocidad de propagación de la onda. Si en algún momento a lo largo del fuste se produce un cambio de la impedancia de Z1 a Z2, cuando la onda de presión Fi llega a dicha sección, parte de ella se refleja hacia arriba (Fu) y otra parte se transmite hacia abajo (Fd), de tal manera que las dos condiciones de equilibrio y de continuidad se satisfagan.

La resolución de esas condiciones, nos conduce a determinar el valor de dichas fuerzas:

$$F_d = F_i \left[\frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \right]$$

$$F_u = F_i \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right]$$

En el caso de un pilote uniforme $Z_1 = Z_2$. Un caso evidente de la ausencia extrema de uniformidad es el que se presenta al final del pilote, en su punta, donde $Z_2 = 0$, por lo que la onda será completamente reflejada hacia arriba, y Fu será de signo contrario a Fi.

Si existe un cambio de la impedancia, se producirá una reflexión de la onda transmitida, que recorrerá el fuste hacia arriba, y que alcanzará la cabeza del pilote en un tiempo igual a dos veces la distancia de la situación de la perturbación, dividida por la velocidad de la onda "C".

Para los pilotes ejecutados "in situ" es necesario que haya transcurrido al menos una semana, desde el hormigonado y estén descabezados para realizar el ensayo con la mayor fiabilidad, puesto que es importante un suficiente curado del hormigón y disponer de un hormigón sano.

La cabeza del pilote debe ofrecer una superficie con el menor número de irregularidades posibles para facilitar la realización del ensayo y colaborar a su fiabilidad. No debe existir tierra, lechada, mortero, u otros, sobre la cabeza del pilote. Evidentemente, en caso de encontrarse hormigonada la viga de atado o el encepado, el ensayo no se podrá realizar.

El ensayo se realiza conforme a la norma NFP 94-160-2 y NFP 94-160-4.

El método de impedancia es más barato que el sónico.

2.2. PROBLEMÁTICA INHERENTE

Una vez descrita la metodología de sendos métodos de auscultación estamos en disposición de describir las ventajas, inconvenientes y limitaciones de sendos métodos:

Método ultrasónico de Cross-hole.

- Ventajas:
 - o Permite localizar con mayor exactitud la localización del fallo en profundidad.
 - o Permite conocer con mayor fiabilidad la ubicación dentro de la sección transversal de la coquera, intrusión, etc...
 - o En base a lo anterior, resulta más fácil comprobar la repercusión del fallo sobre la resistencia estructural del pilote.
- Inconvenientes:
 - o Requiere la reducción de la sección estructural efectiva por la implantación de los tubos de ensayo.
 - o La propia instalación de los tubos junto al armado puede afectar al propio recubrimiento del acero e incluso a la buena ejecución del vibrado y al reparto del hormigón en la sección transversal. En este sentido será muy importante considerar el adecuado número de tubos en función de la sección a auscultar. Una sección de diámetro reducido con tres o cuatro tubos puede resultar contraproducente, generando problemas irreversibles; para evitar estos problemas se recomienda seguir la normativa francesa como se ha dicho antes.
 - o El coste de este ensayo es mayor que el de impedancia.

- Requiere de una cuidadosa instalación de los tubos para evitar la contaminación de los mismos.
- Existen limitaciones a las condiciones de realización del ensayo facilitando la colocación del receptor y el emisor y la polea de movimiento, así como el software de registro.
- Debe corroborarse el correcto movimiento del receptor y el emisor.
- El emisor se desplaza por el tubo lleno de agua, no existiendo acoplante con la pared del tubo, lo cual establece limitaciones a la interpretación de los resultados.

Método de impedancia.

- Ventajas:
 - Es un ensayo más barato.
 - Es un ensayo más fácil de ejecutar.
 - La onda de esfuerzo se aplica directamente sobre el elemento a auscultar.
 - No se requiere la instalación alguna de conductos, por lo que no se afecta a la integridad del pilote.
- Inconvenientes:
 - La exactitud en la localización de los defectos es menor, tanto en la sección tipo como en profundidad.
 - Como consecuencia de lo anterior es difícil analizar la repercusión sobre la resistencia estructural de la cimentación.
 - Requiere de unas condiciones de descabezado muy exigentes en lo que se refiere a regularidad y limpieza.
 - Para condiciones adversas de ejecución la aplicación del método es inviable.
 - Defectos parciales en la sección a veces no son detectados.

3. APLICACIÓN A UN CASO CONCRETO. EL VIADUCTO DEL ANDARAX EN LA A-348.

Para contrastar el análisis anterior se ha procedido a la auscultación de la cimentación de un viaducto con sendos métodos. Se ha elegido el viaducto del Río Andarax en la A-348. Este puente se incluye dentro de la obra de Acondicionamiento de la A-348 desde Fondón al Cruce de Beires, cuya dirección técnica es responsabilidad del que suscribe.

Los ensayos de autocontrol ya se han previsto a nivel de proyecto mediante el método ultrasónico de cross-hole. Por su parte, se ha actualizado el plan de ensayos de verificación incorporando ensayos de impedancia como contraste, en aquellos pilotes en los que se detecten fallos. En el momento de iniciar la redacción de este estudio aún no se había iniciado la auscultación de los pilotes.

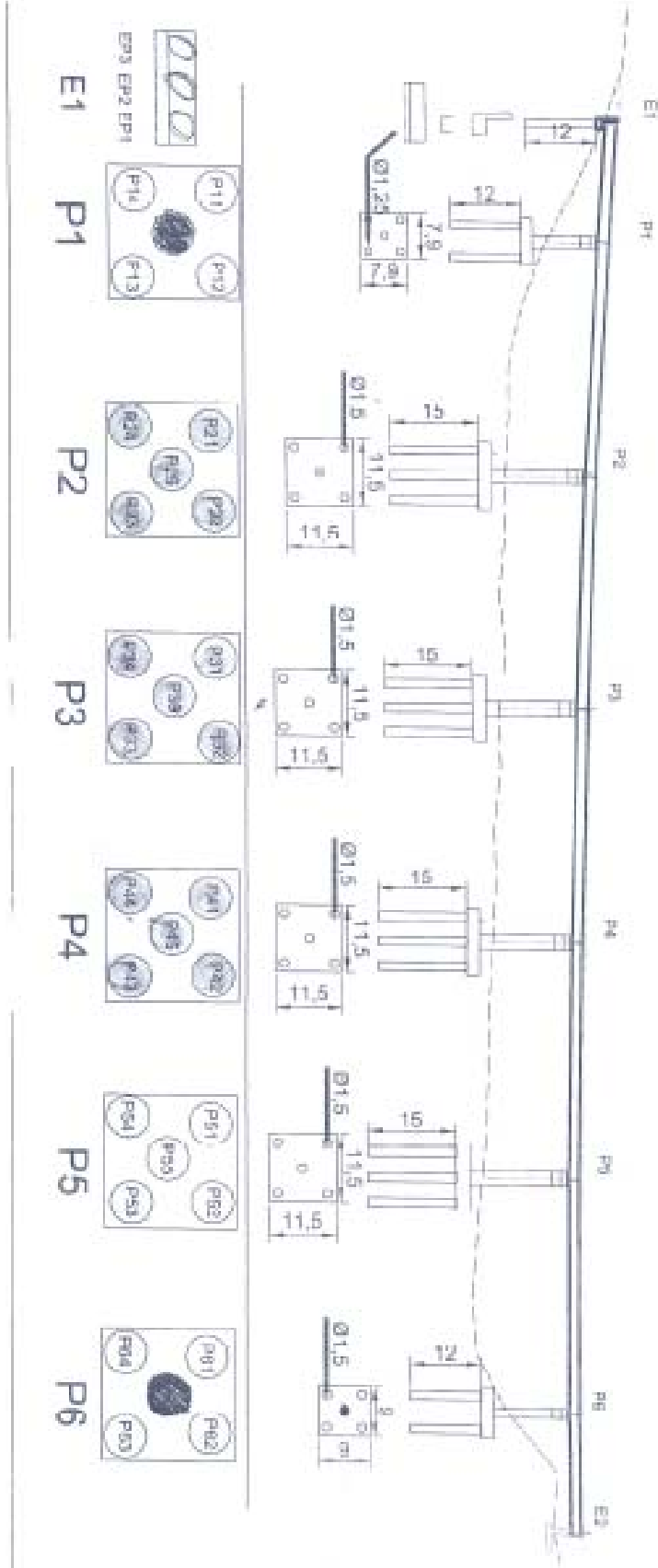
La tipología de viaducto corresponde a tablero de vigas en doble T de 2 m de canto tipo “Rinoceronte”, con longitudes de 40m en los 5 vados centrales y 20m en los extremos. Las pilas de entre 2 y 2,5 m de diámetro culminan en dinteles de tipo martillo, para recoger las cargas de las 4 vigas que ocupan los 10m de anchura de tablero. El tablero

tiene 20cm de espesor y el espacio entre vigas se ocupa con placas prefabricadas de encofrado perdido de 4cm de espesor y el porexpán en la zona de apoyo en pilas. La estructura culmina con las aceras laterales de 1m, la bionda empotrada y la barrera de seguridad metálica. La cimentación es profunda, excepto en el estribo 2 que se realiza a través de una losa. Los encepados de pilotes poseen cada uno 4 o 5 elementos de diámetros de perforación de 1500 y 1250mm, con profundidades que oscilan entre los 12 y 15m.

La obra es ejecutada por Ferrovial –Agromán S.A.

En la página siguiente se ofrece el perfil longitudinal del puente y la estructuración de los pilotes contemplada en el esquema director de la obra.

ESTRUCTURACIÓN PILOTES DE LA ESTRUCTURA DEL RIO ANDARAX



Para los ensayos de autocontrol con el método ultrasónico de Cross-hole se contrató a la empresa Cemosa S.A., mientras que los ensayos de verificación fueron elaborados por Eycom S.L.

El objetivo perseguido en el presente análisis puede resumirse como sigue:

- Determinar la calidad de la ejecución de los pilotes.
- Conocidos problemas en la integridad de los pilotes por el ensayo ultrasónico, corroborar los mismos mediante un contraste con el método de impedancia.
- Detectada la ubicación de la coquera o intrusión, determinar la afección a la capacidad estructural del pilote.
- Finalmente contrastar los resultados de la resistencia del hormigón puesto en obra con el de las probetas ensayadas en laboratorio.

Ejecución de los pilotes y colocación de los tubos sónicos.

Los pilotes fueron subcontratados a la empresa PILSON S.A. Debido a la presencia del nivel freático asociado al subálveo del Río Andarax, y dado el carácter de los materiales en profundidad, (arenas y gravas) se decidió la ejecución de los pilotes con encamisado.



Ejecución de la perforación con camisa metálica.



Perforación completada

Con el montaje de la ferralla se realiza la fijación de los tubos sónicos a las armaduras. Se previeron puntos de atado cada tres metros con cerco adicional de diámetro 16 mm.



Montaje de la ferralla con tubos sónicos.



Antes del montaje de la ferralla la dirección de obras ordenó la ejecución de un tapón de hormigón en el fondo para mermar la contaminación en el fondo y las posibilidades de sifonamiento en la punta del pilote.

Durante el montaje de la ferralla se comprobó que los tubos sónicos no se separaron de la armadura y se mantuvieron en su posición vertical.



Colocación de la ferralla.



Se completa la colocación de la armadura.



Se vuelve a comprobar que colocada la armadura dentro del encamisado, los tubos sónicos se mantienen en su posición.

Posteriormente se procedió al hormigonado con tubo tremi, a la retirada del encamisado y a la obtención de muestras del hormigón en probetas. El hormigón previsto era del tipo HA-25.

Pasados quince días, se procedió a realizar los ensayos de integridad.

Seguidamente describimos los ensayos realizados.

Auscultación por método ultrasónico de Cross-hole.

Los ensayos se han realizado según la norma NF P 94-160-1. Se permite para el nivel de control realizado disminuir los coeficientes de seguridad empleados hasta un límite del 20% adicional en la resistencia del pilote según la norma francesa DTU 13.2. No obstante, este criterio no ha sido tenido en cuenta a nivel de proyecto.

Para el ensayo se ha empleado el siguiente equipo:

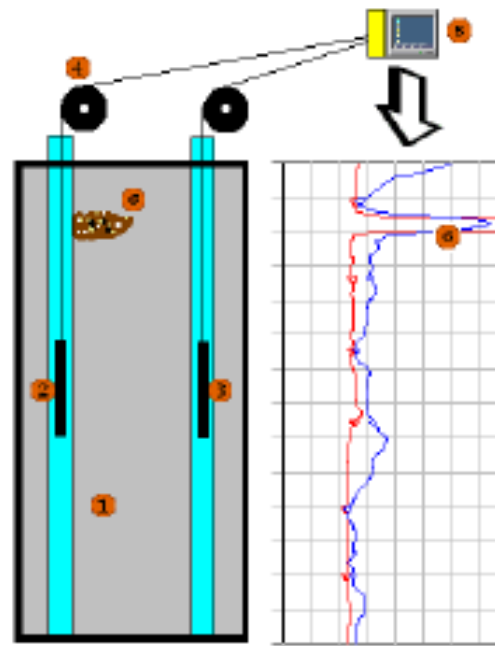
- Tubos de acero galvanizado de diámetro interior 42 mm y exterior 48 mm, (4 por pilote), con tapón en el fondo y en coronación, longitud 6 m con juntas soldadas intermedias, (no pudieron conseguirse juntas arrosadas). En la foto de la imagen adjunta se observan los tubos durante el montaje de la ferralla del pilote y los tapones en cabeza para garantizar la no contaminación interior de los mismos.



- El equipo empleado es un sistema de perfil sónico Crosshole de Olson Instruments (CSL=Crosshole Sonic Logging). El sistema de perfil sónico

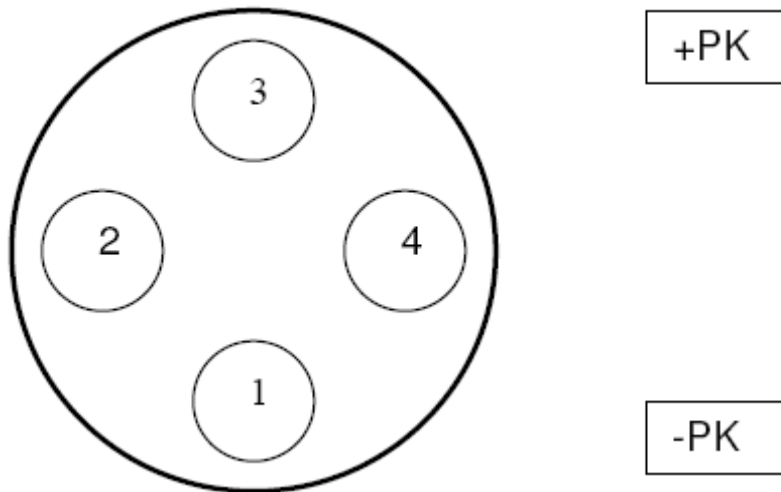
Crosshole consta de 4 componentes básicos en la mayoría de las aplicaciones del ensayo. Estos cuatro componentes son:

- un PC portátil NDT (Non Destructive Testing) Olson que lleva instalado una tarjeta de adquisición de datos de alta velocidad, el software CSL de Olson Instruments para la adquisición y análisis, y los módulos CSL del generador de impulsos y del amplificador;
- una unidad de descenso/ascenso con medida de profundidad;
- y dos transductores. Estos componentes están conectados entre sí mediante cables para formar un sistema completo. El módulo generador de impulsos CSL es una unidad electrónica que contiene un generador de impulsos de 450 V y un circuito de medida de profundidad. El módulo amplificador consta de un circuito de amplificación y un filtro de señal de 1 Canal con cable interno hasta la tarjeta de admisión de datos. La tarjeta de admisión de datos es una tarjeta de M-muestras por segundo instalada en el PC NDT. Los transductores son Hidrófobos piezoeléctricos para transmitir y recibir la energía ultrasónica a través del hormigón.

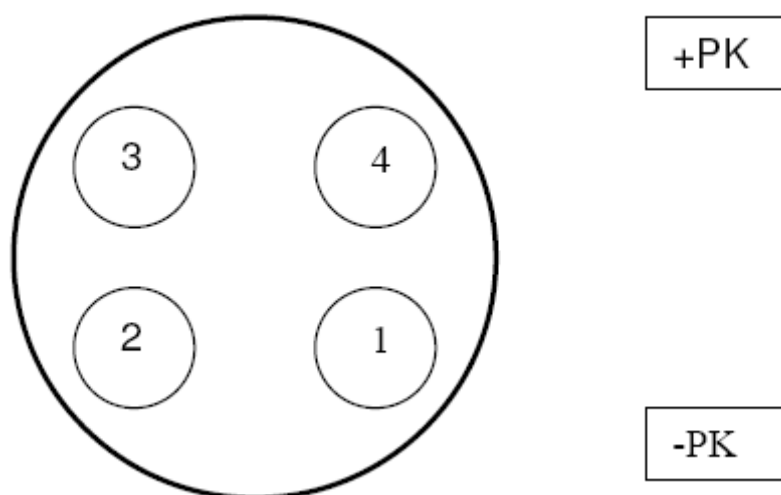


A la hora de realizar el ensayo la numeración de los tubos tiene un papel fundamental; se ha seguido el siguiente criterio:

- El tubo nº1 será aquel que se encuentra en el PK menor, los demás se nombran en sentido horario.



- En el caso de que tengamos dos tubos situados a igual P.K., tomamos como tubo número 1 el de la derecha.



Para la representación gráfica de los resultados se consideró como origen de la escala la coronación del tubo.

Una vez estructurados los tubos en cada pilote se procedió a instalar los equipos; previamente se comprobó que dichos tubos se encontraban correctamente y se llenaron de agua con ayuda de una cuba; el equipo generador empleado fue la propia batería del vehículo de CEMOSA conectado con pinzas. Para cada par de tubos se ubicó el equipo de descenso / ascenso, las poleas y los transductores dentro de los tubos. Conectados todas las unidades entre sí e iniciado el software de aplicación se procedió al inicio del ensayo.



Montaje del equipo



Desarrollo del ensayo

Auscultación por método de impedancia

Obtenido el primer informe sobre auscultación por ensayo sónico en los pilotes se procedió a contrastar los resultados por el método de impedancia en las pilas 2, 3 y 4 que eran donde se habían detectado algunos fallos.

La empresa responsable de los mismos nos pidió que procediéramos al descabezado de los mismos antes de realizar los ensayos y se ejecutara el hormigón de limpieza de los encepados. Por esta razón la longitud de representación de los pilotes en los dos ensayos distarán en la altura del descabezado que varía entre 0,6 y 0,7 m según pilote. Antes del ensayo se aplicó agua a presión sobre la cabeza de los pilotes, eliminando restos de barro, aunque quedó algo de agua en la coronación de los pilotes.

Los ensayos se han llevado a cabo por Eycom siguiendo la norma ASTM D5882. Estos se ha realizado con un equipo PET compuesto de:

- Martillo manual generador de onda sónica.
- Acelerómetro receptor PET con acoplante de cera de petróleo.
- Amplificador.
- Tarjeta electrónica de registro.
- Software de representación gráfica PET.



Limpieza y preparación de la superficie del pilote



Generación de onda sónica y aplicación de acelerómetro



Recogida de información e interpretación en software.

Resultados de sendos ensayos

Método ultrasónico Cross-Hole.

El retraso observado en la parte superior de algunas de las gráficas de los perfiles sónicos es originado por la parte superior de los tubos, que se encuentran fuera del hormigón. Tras la auscultación de los 31 pilotes se han detectado algunos retrasos en los tiempos de llegada de los impulsos ultrasónicos. Estos retrasos corresponden a descensos en las velocidades de propagación en zonas donde el hormigón del pilote entre los tubos presenta alguna irregularidad. Estas singularidades en los pilotes pueden corresponder a coqueras, lavado o contaminación del hormigón. En general sólo se han detectado tres pilotes con fallo parcial en el fuste; el resto de fallos se producen en el fondo coincidiendo con el tapón de hormigón ejecutado antes de colocar la ferralla. Desde este punto de vista podemos decir que la ejecución de los pilotes ha sido muy buena, y probablemente la razón estribe en la ejecución de dicho tapón y en el correcto encamisado del pilote, unido al buen funcionamiento del tubo tremi.

Seguidamente vamos a describir los fallos obtenidos en pilotes de las pilas 2, 3 y 4.

Pila 2 Pilote 2

Tras la auscultación de este pilote se detectan los siguientes retrasos:

Lectura 3-4: Retraso del 58 % entre 14,7 y 15,1 metros de profundidad desde boca de tubo.

Lectura 1-4: Retraso del 70 % entre 14,7 y 14,9 metros.

Lectura 2-4: Retraso del 25 % entre 14,5 y 14,9 metros.

Se trata de un defecto local de 20-40 centímetros de espesor en las proximidades del tubo 4.

Pila 3 Pilote 2

Se ha detectado un retraso en 2 de las 6 lecturas. Se trata de un defecto a unos 12 metros de profundidad aproximadamente, de unos 40-70 centímetros de espesor aproximadamente, y localizado entre los planos que contienen a las parejas de tubos 1-4 y 2-4. Se trata de un defecto local del pilote.

Lectura 1-4: Retraso del 82 % entre 12,2 y 12,9 metros de profundidad.

Lectura 2-4: Retraso del 76 % entre 12,3 y 12,7 metros de profundidad.

Pila 4 Pilote 4

Para este pilote existe un defecto de 20 centímetros de espesor (entre 12,3 y 12,5 metros) y un retraso del 80 %. Se trata de un pequeño defecto sin continuidad en el resto de las lecturas.

Los defectos detectados tras la auscultación de estos 3 pilotes no representan fallos estructurales graves, ya que son defectos locales provocados por algo de contaminación y no afectan a la totalidad del pilote. El resto de los pilotes no presentan irregularidades.

Las profundidades por parejas de tubos son las que siguen.

PILA 2

PILA	PILOTE	Nº DE TUBOS ENSAYADOS	Nº DE LECTURAS	PAREJA DE TUBOS PARA CADA LECTURA	PROFUNDIDAD ALCANZADA (m)
2	1	4	6	1-2	15.1
				2-3	14.8
				3-4	14.8
				1-4	15.0
				1-3	14.7
				2-4	14.9
	2	4	6	1-2	15.1
				2-3	15.4
				3-4	15.4
				1-4	15.5
				1-3	15.3
				2-4	15.4
	3	4	6	1-2	15.2
				2-3	15.3
				3-4	15.4
				1-4	15.2
				1-3	15.1
				2-4	15.1
	4	4	6	1-2	15.3
				2-3	14.9
				3-4	14.7
				1-4	15.5
				1-3	14.8
				2-4	15.4
	5	4	6	1-2	15.2
				2-3	15.4
				3-4	15.5
				1-4	15.1
				1-3	15.2
				2-4	15.5

PILA 3

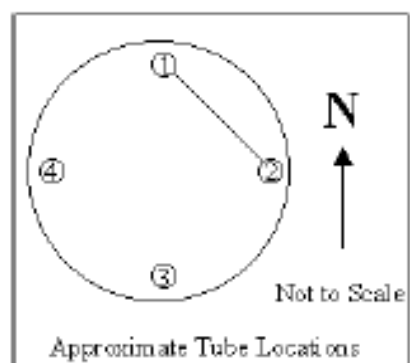
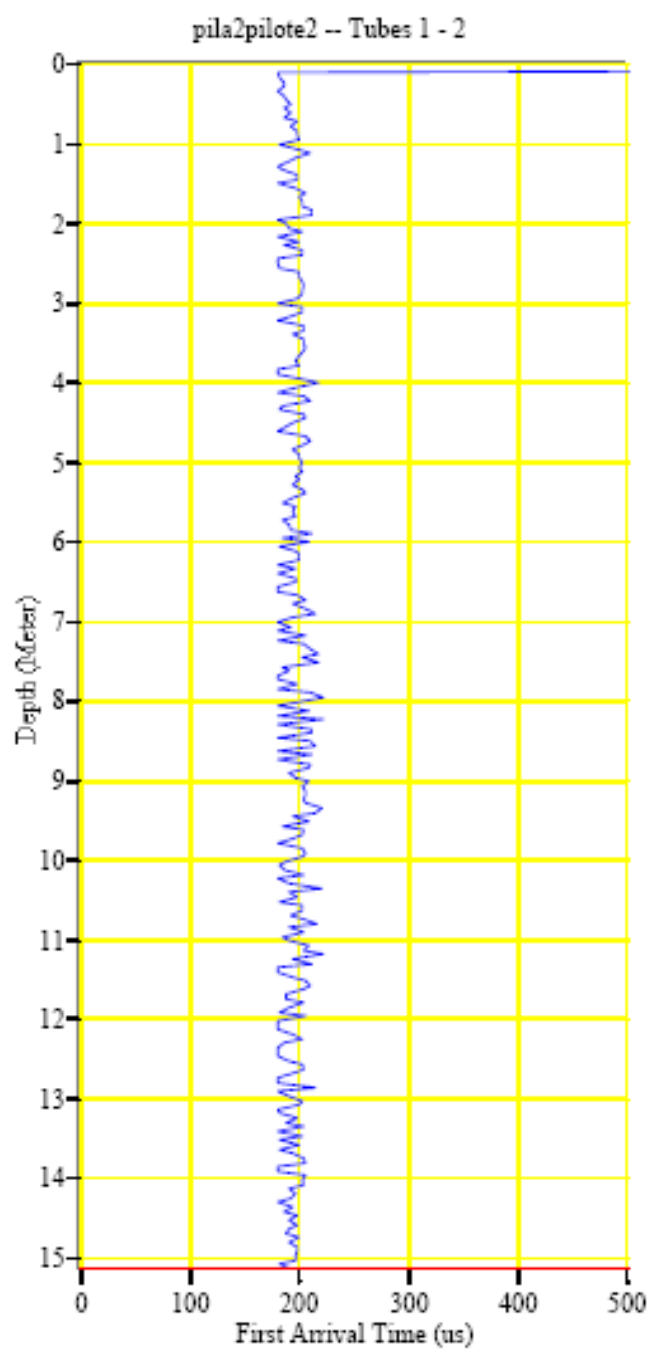
PILA	PILOTE	Nº DE TUBOS ENSAYADOS	Nº DE LECTURAS	PAREJA DE TUBOS PARA CADA LECTURA	PROFUNDIDAD ALCANZADA (m)
3	1	4	6	1-2	15.5
				2-3	15.6
				3-4	15.5
				1-4	15.3
				1-3	15.4
				2-4	15.4
	2	4	6	1-2	15.5
				2-3	15.8
				3-4	15.4
				1-4	15.5
				1-3	15.4
				2-4	15.6
	3	4	6	1-2	15.1
				2-3	15.4
				3-4	15.5
				1-4	15.1
				1-3	15.1
				2-4	15.4
	4	4	6	1-2	15.1
				2-3	15.6
				3-4	15.4
				1-4	15.6
				1-3	15.4
				2-4	15.4
	5	4	6	1-2	15.5
				2-3	15.6
				3-4	15.4
				1-4	15.4
				1-3	15.4
				2-4	15.6

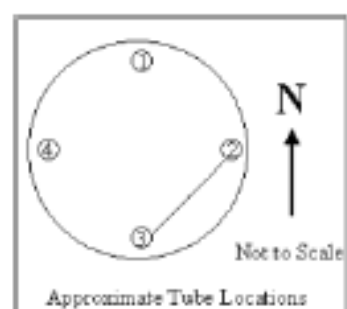
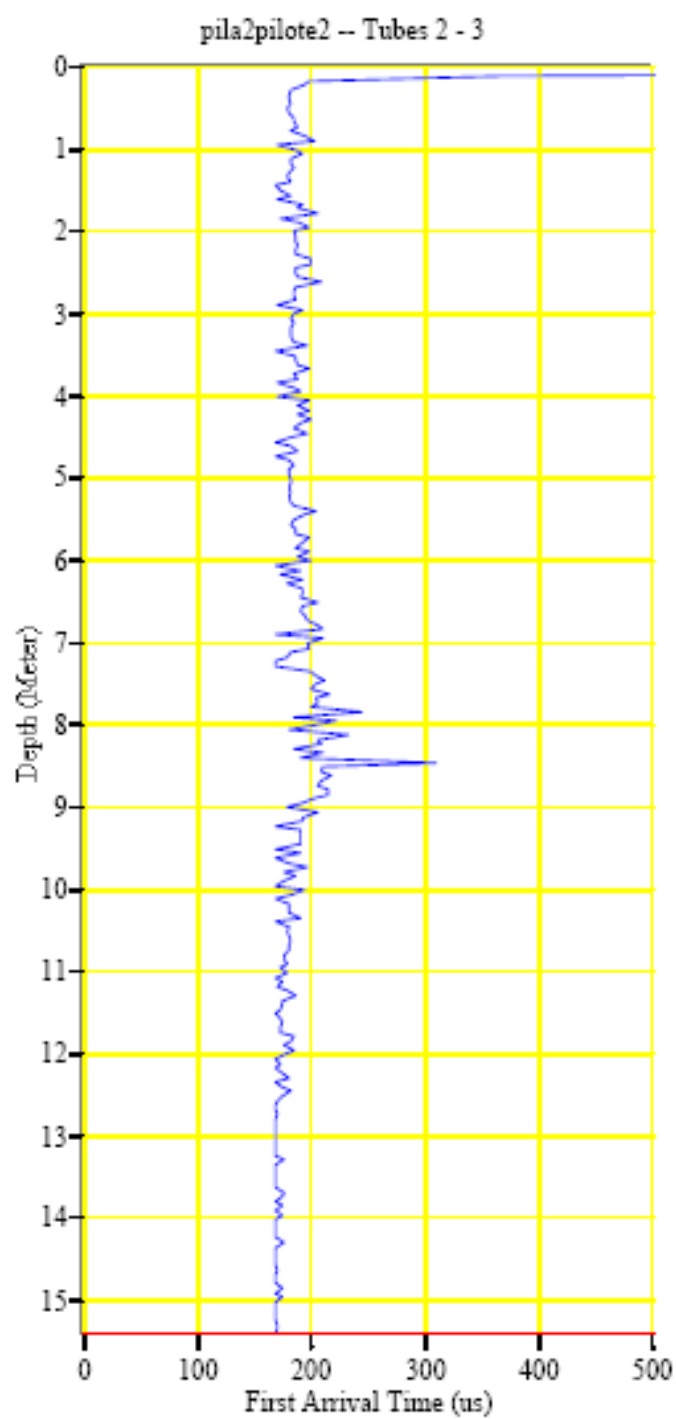
PILA 4

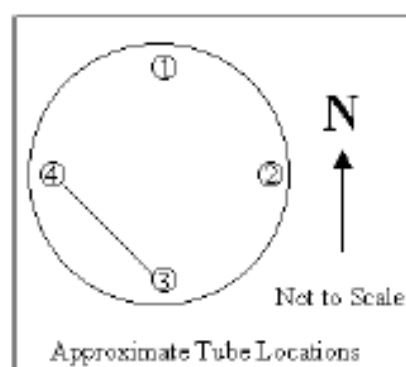
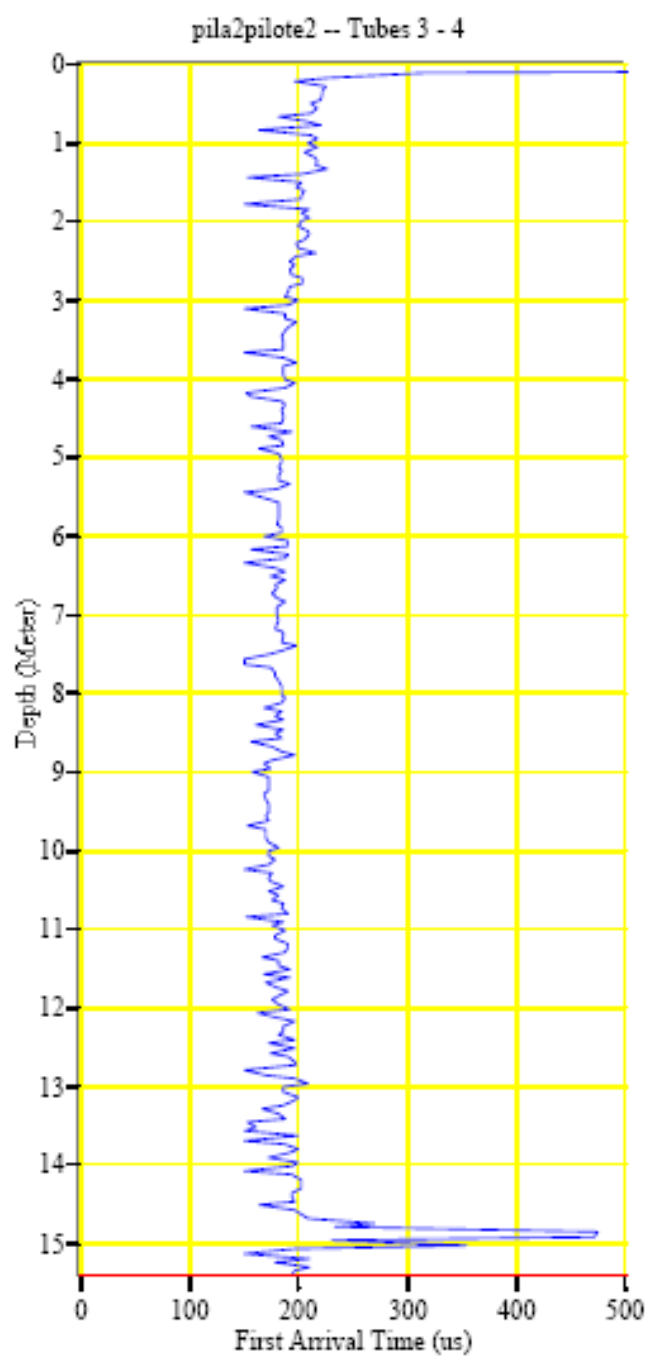
PILA	PILOTE	Nº DE TUBOS ENSAYADOS	Nº DE LECTURAS	PAREJA DE TUBOS PARA CADA LECTURA	PROFUNDIDAD ALCANZADA (m)
4	1	4	6	1-2	15.3
				2-3	15.4
				3-4	15.5
				1-4	15.5
				1-3	15.6
				2-4	15.5
	2	4	6	1-2	14.8
				2-3	14.7
				3-4	14.8
				1-4	14.7
				1-3	14.8
				2-4	14.8
	3	4	6	1-2	15.6
				2-3	14.4
				3-4	14.5
				1-4	15.4
				1-3	14.4
				2-4	15.3
	4	4	6	1-2	14.9
				2-3	15.2
				3-4	15.3
				1-4	15.4
				1-3	15.4
				2-4	15.0
	5	4	6	1-2	15.2
				2-3	15.6
				3-4	15.3
				1-4	15.2
				1-3	15.2
				2-4	15.2

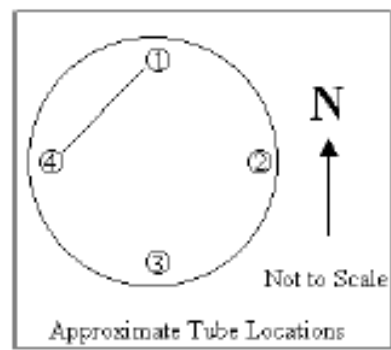
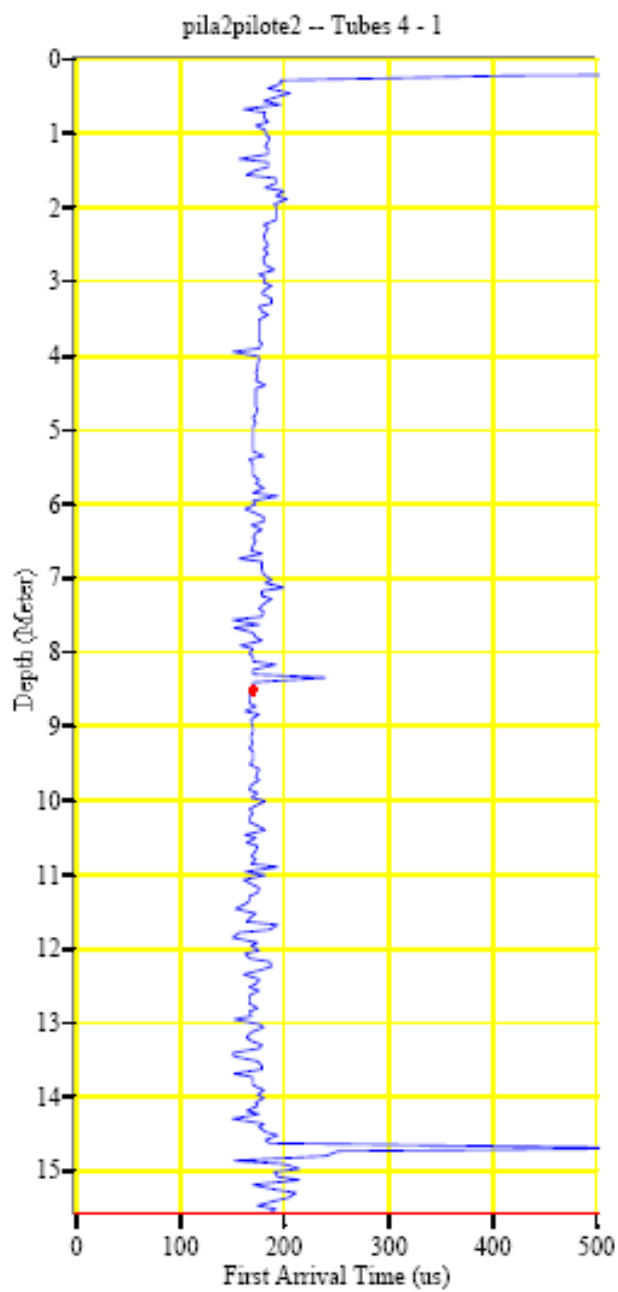
En los tres pilotes con fallo los resultados en tiempo han sido los siguientes:

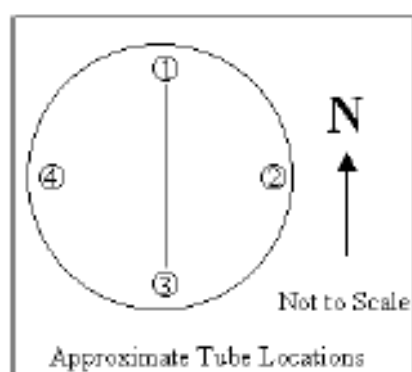
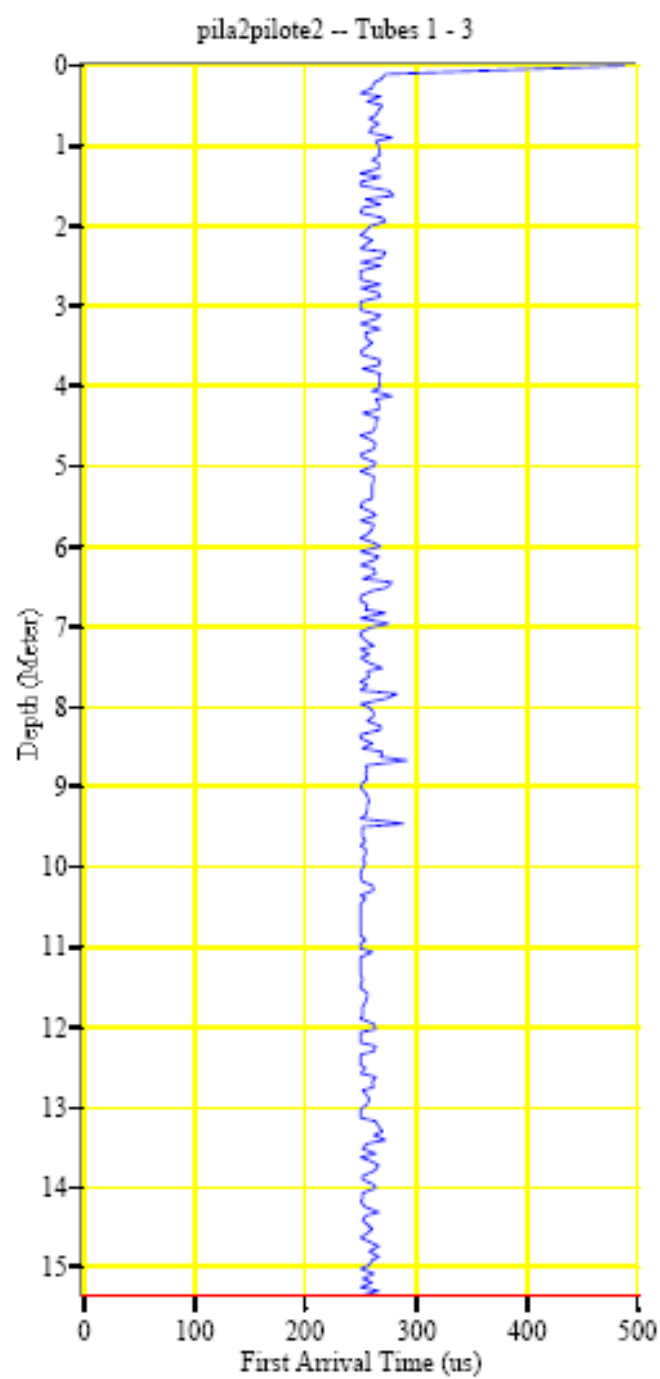
Pilote 2 de la Pila 2.

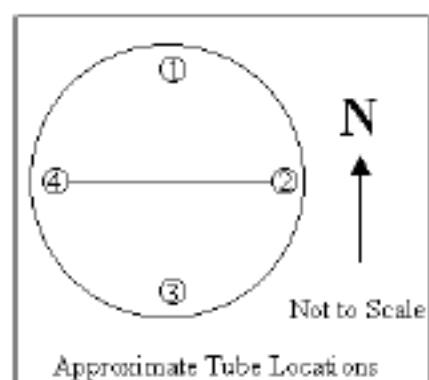
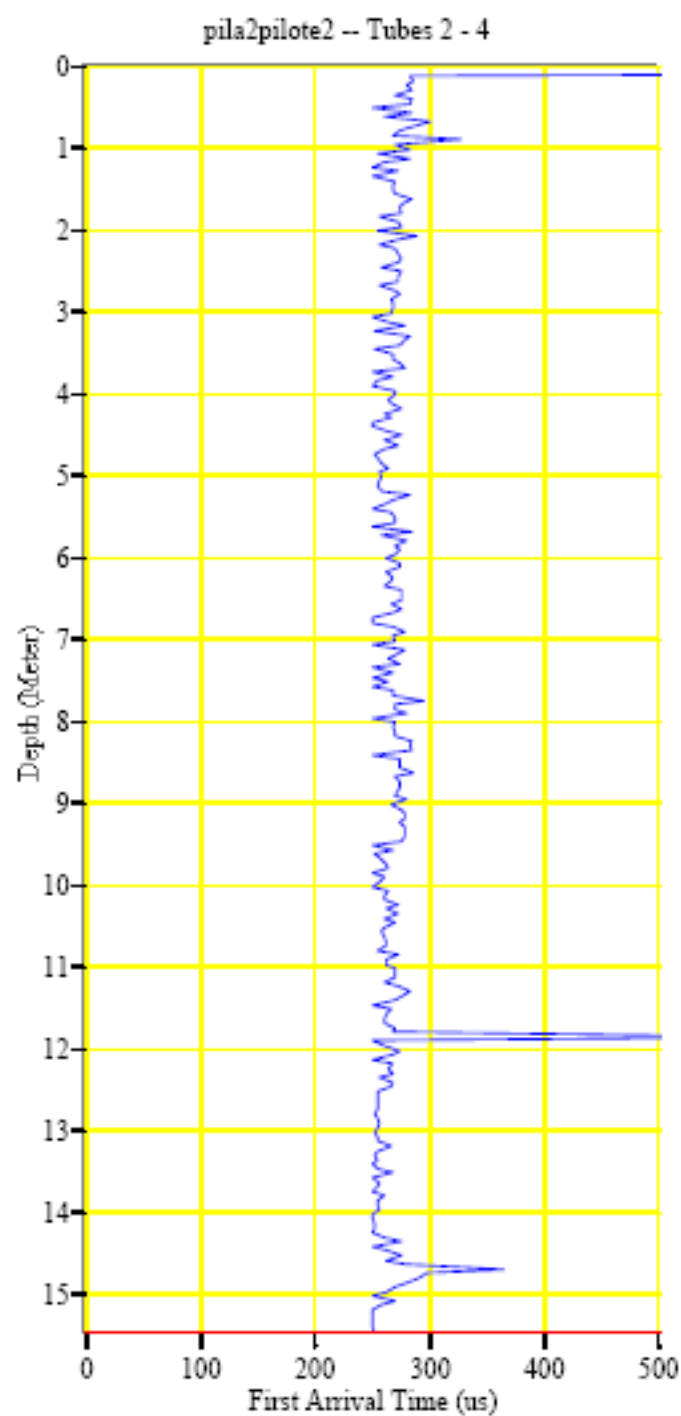




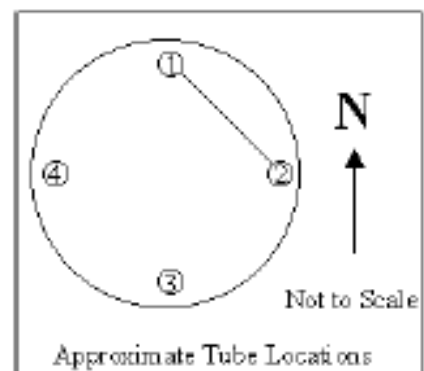
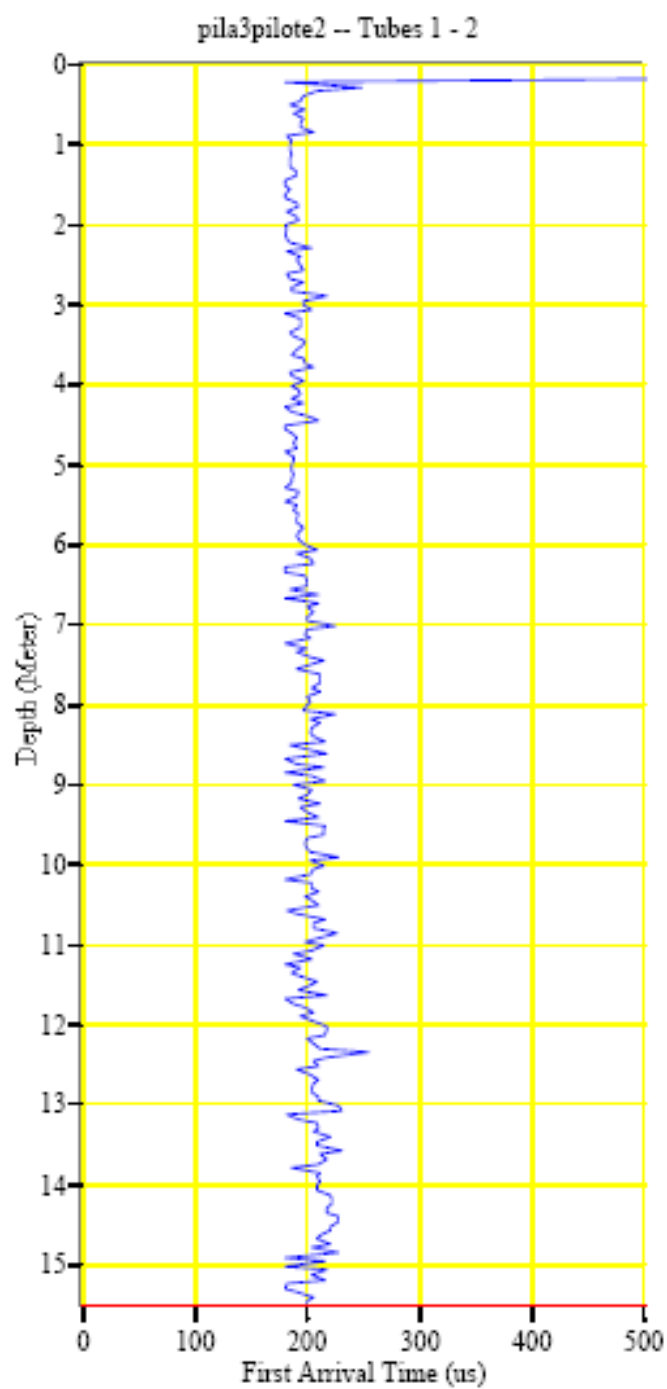


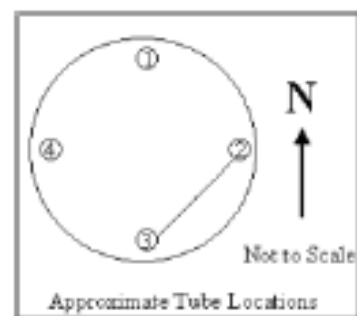
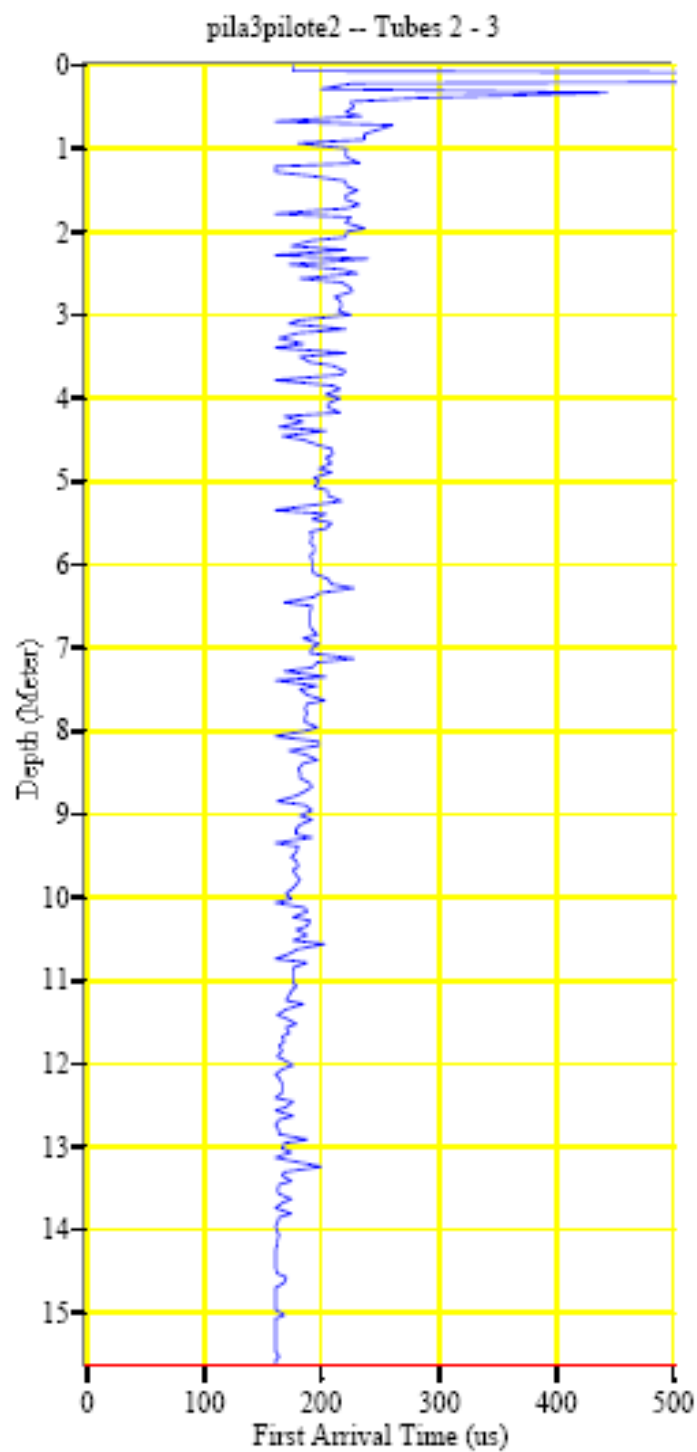


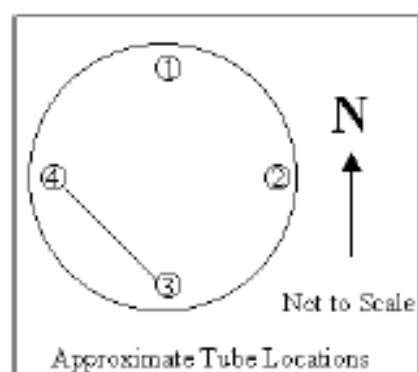
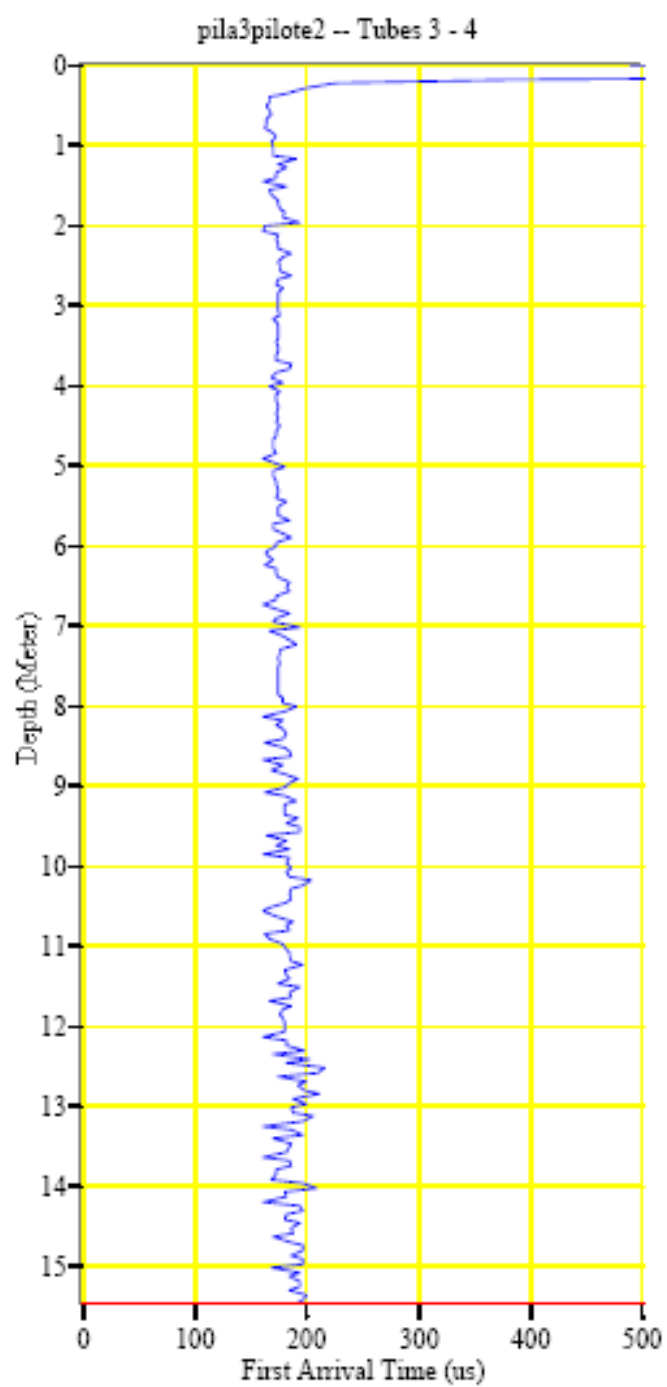


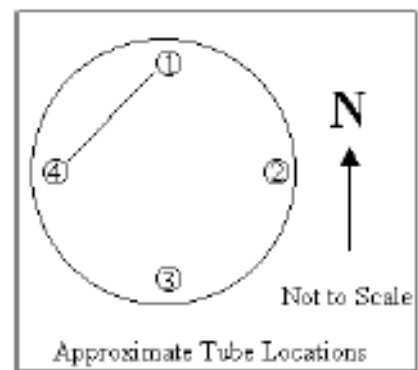
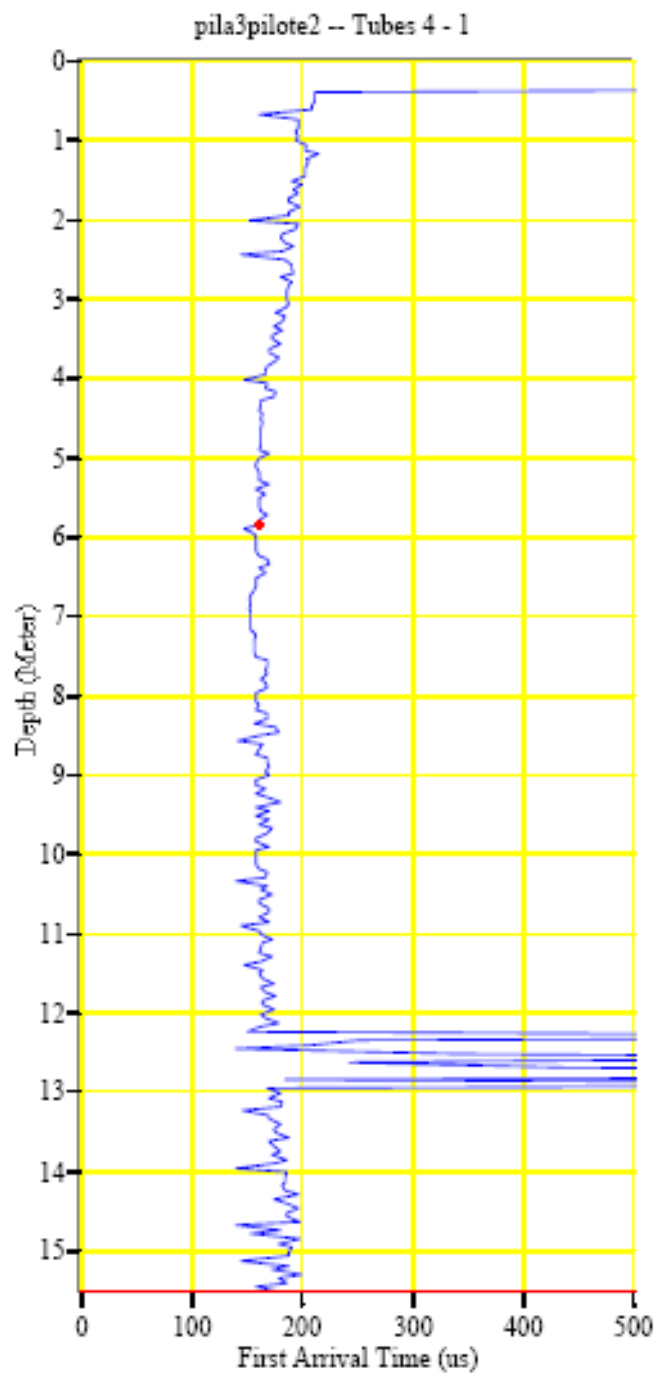


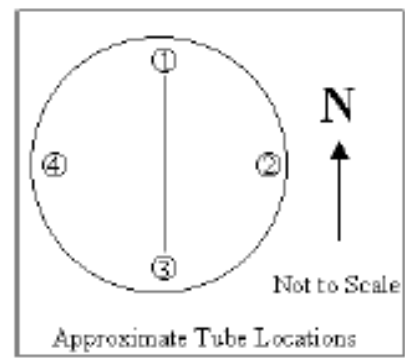
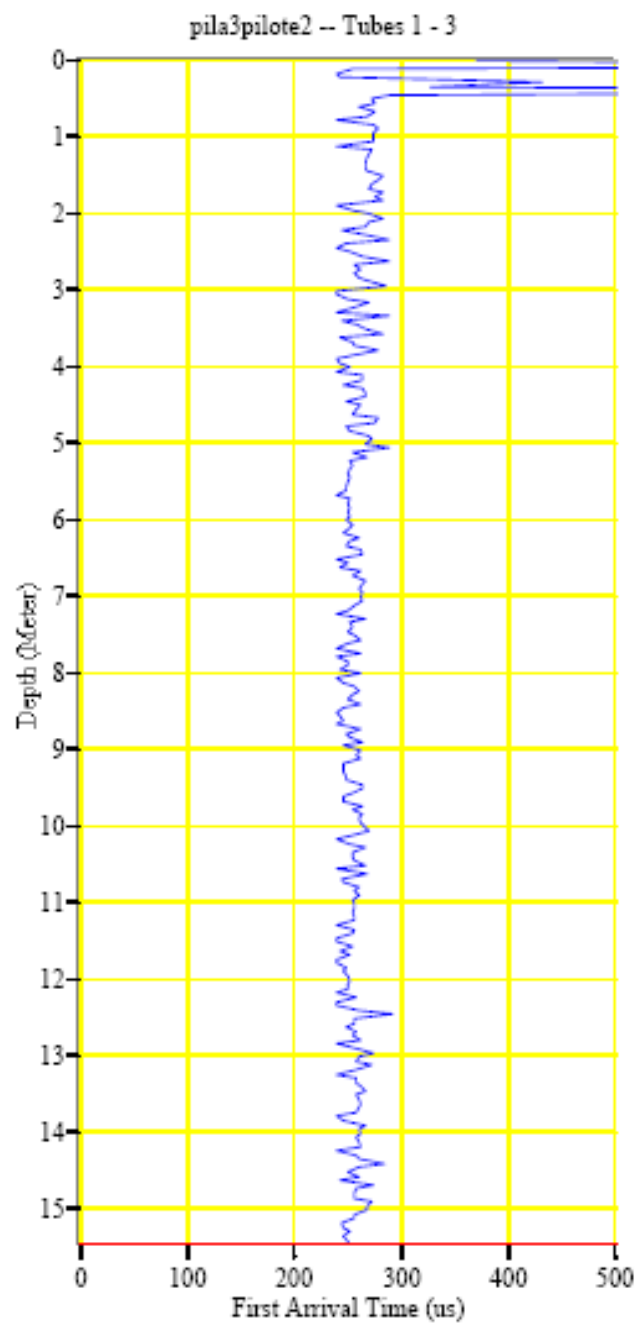
Pila 3 Pilote 2.

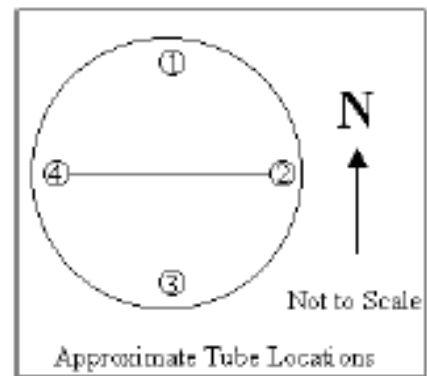
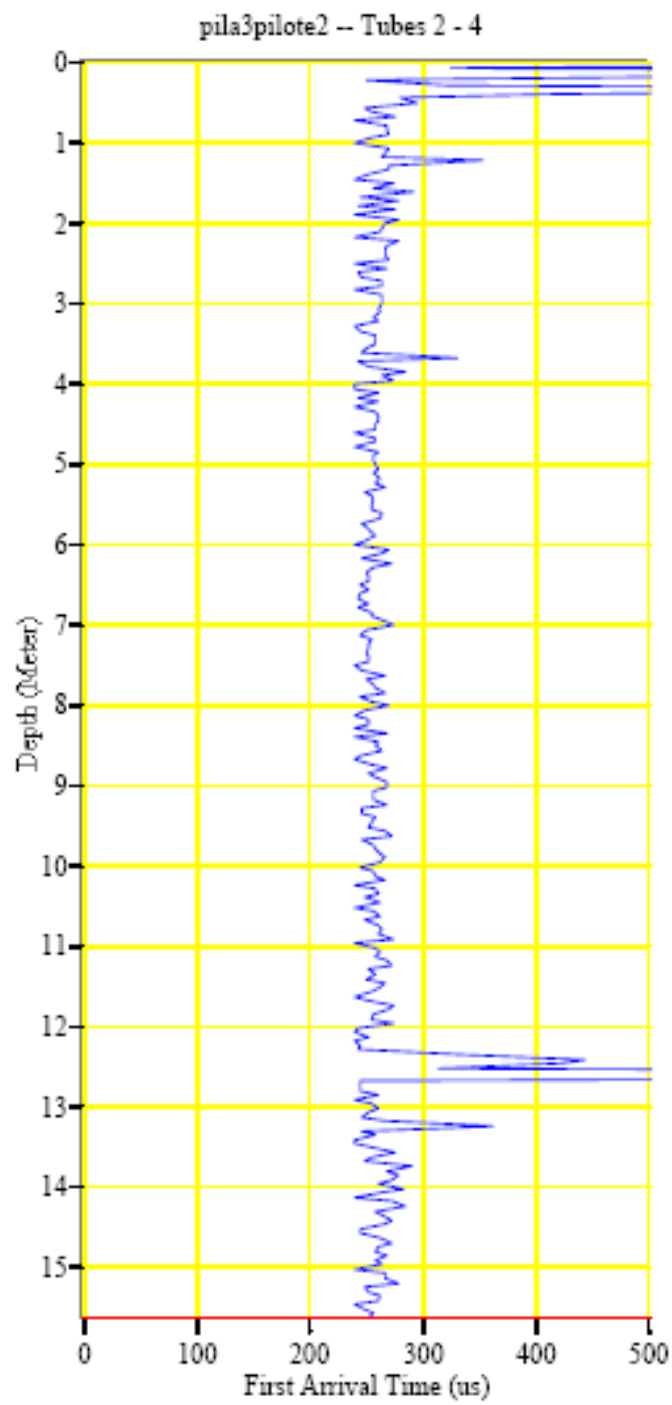




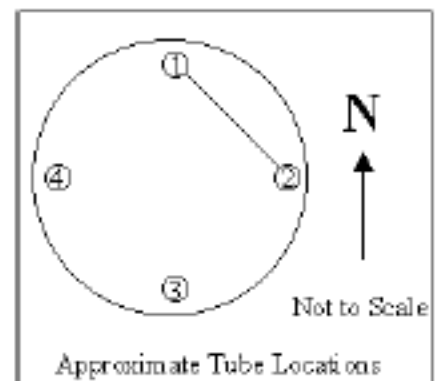
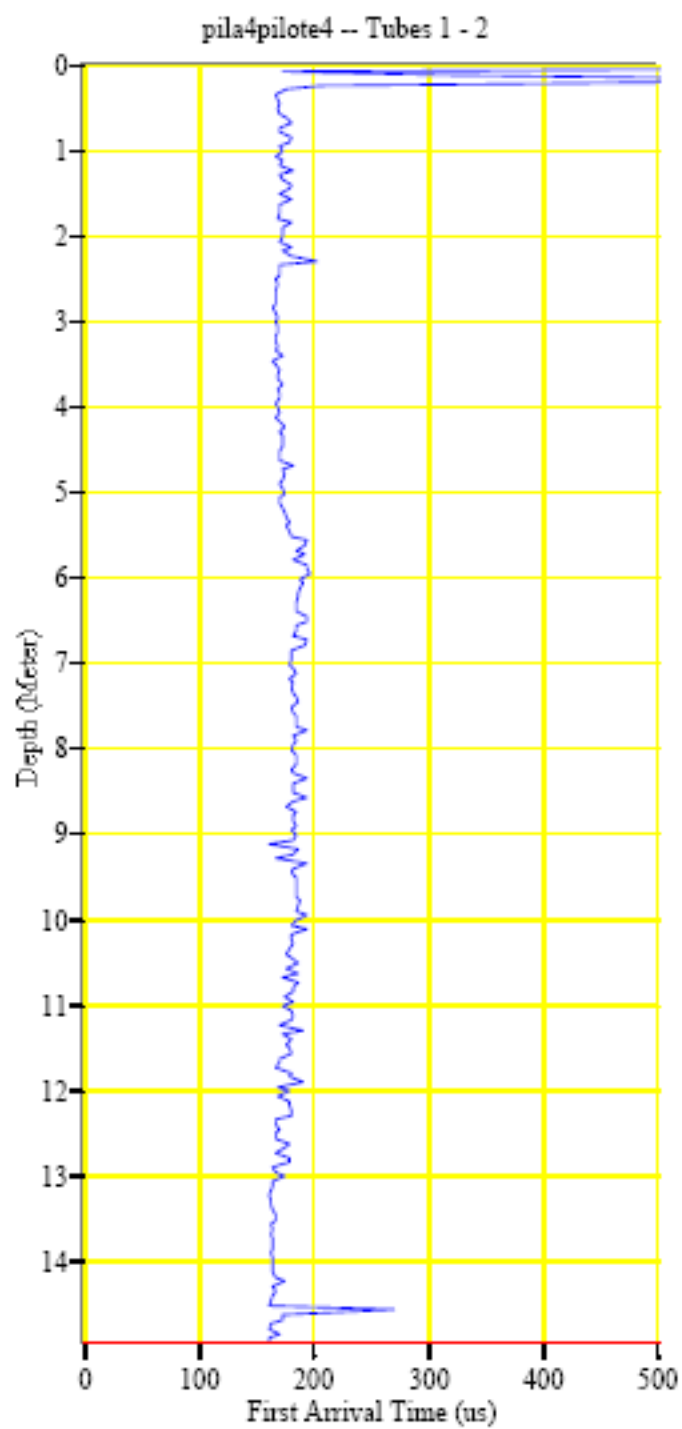


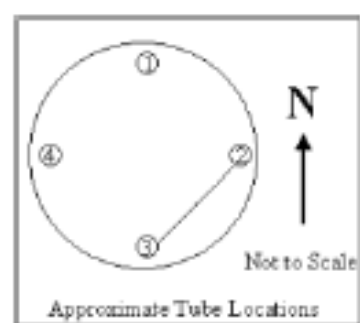
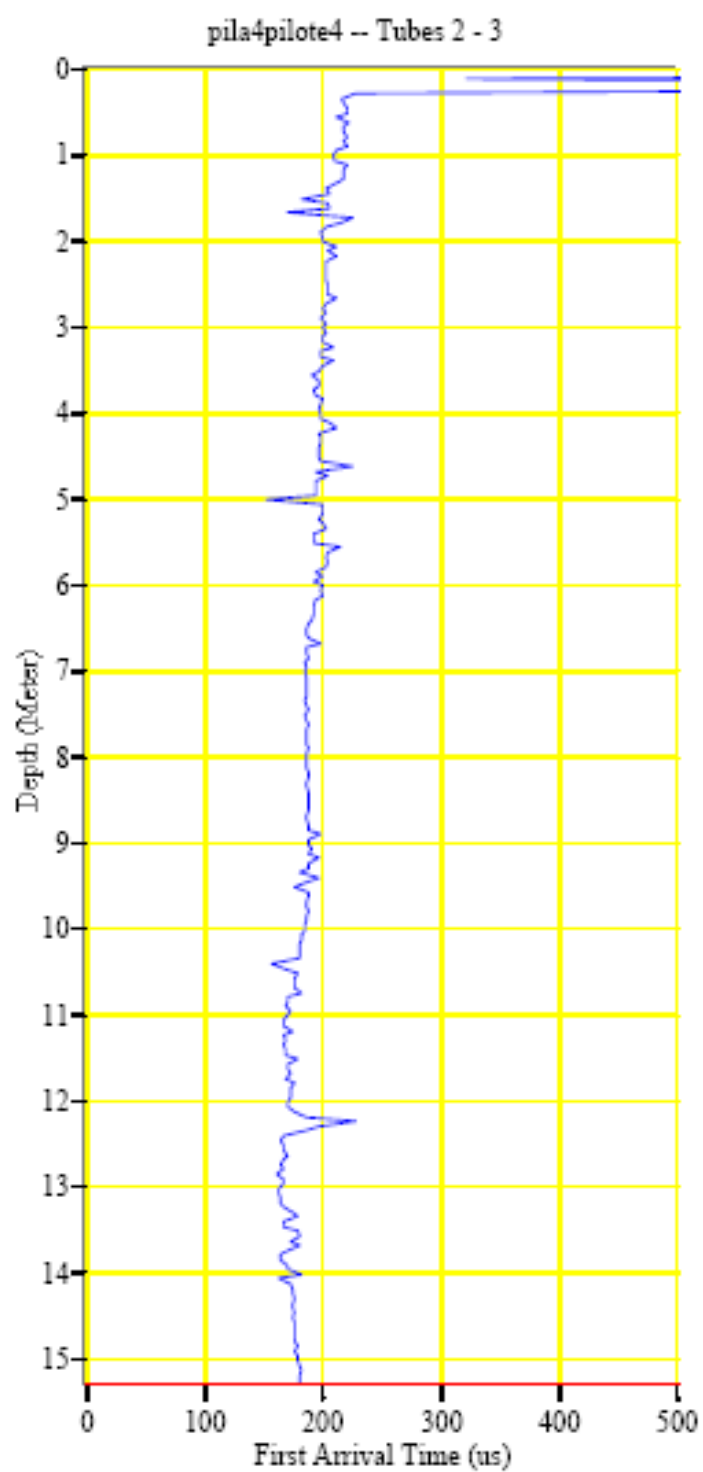


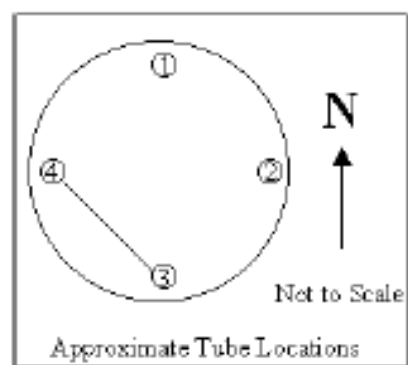
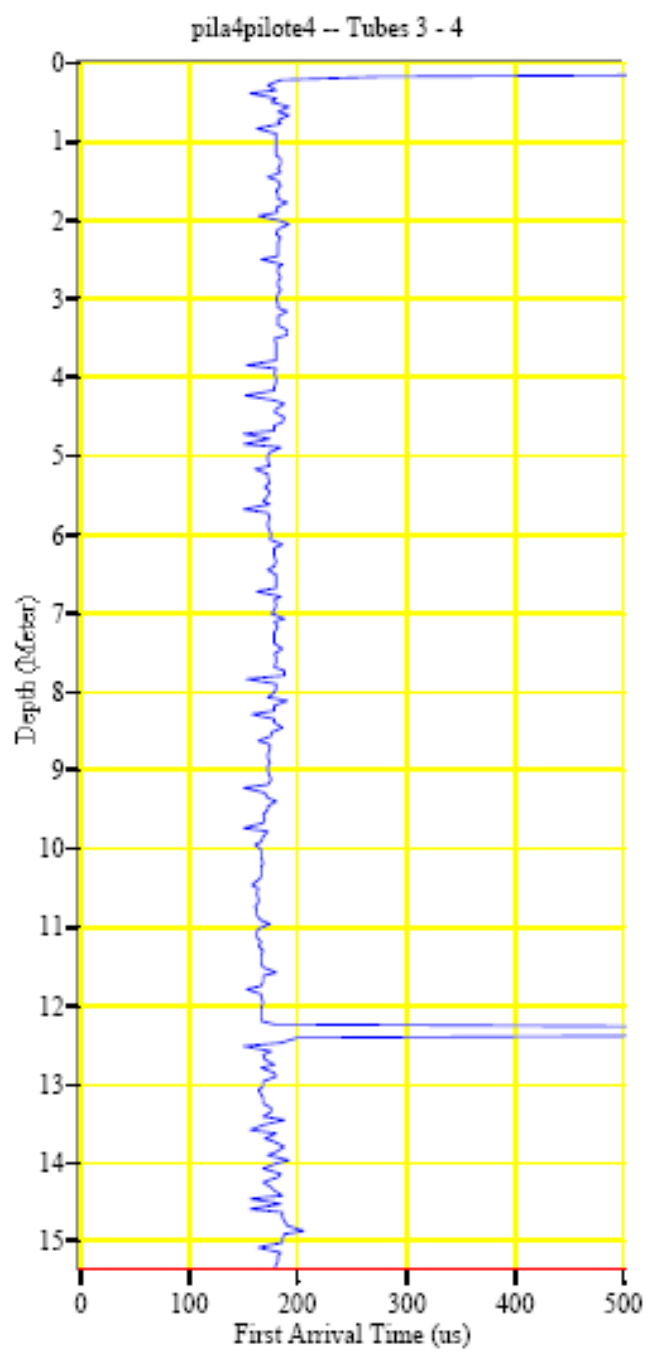


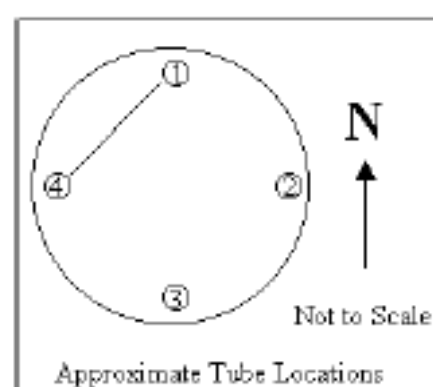
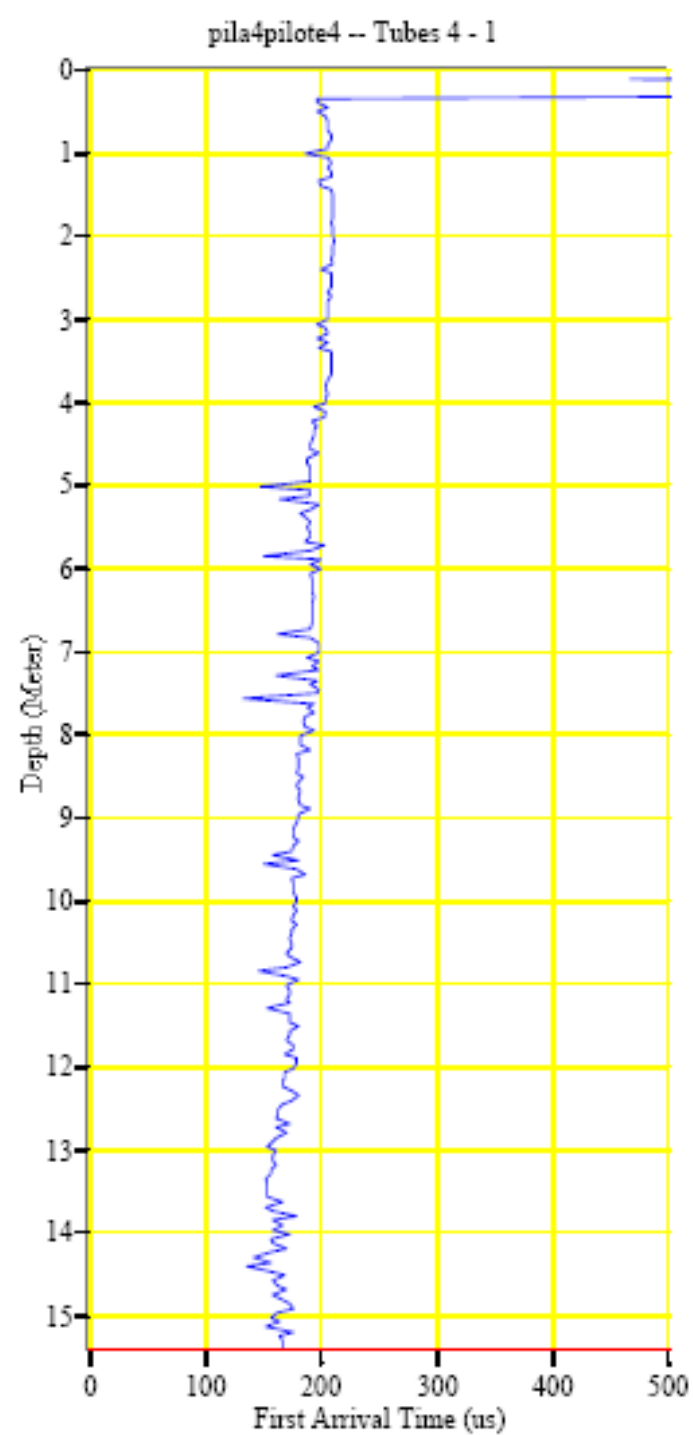


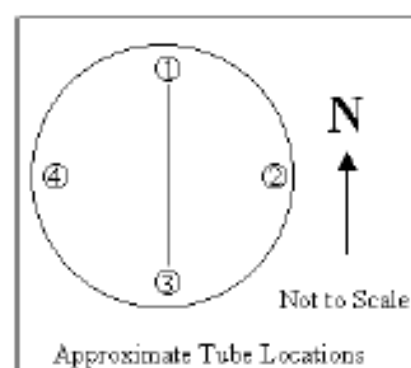
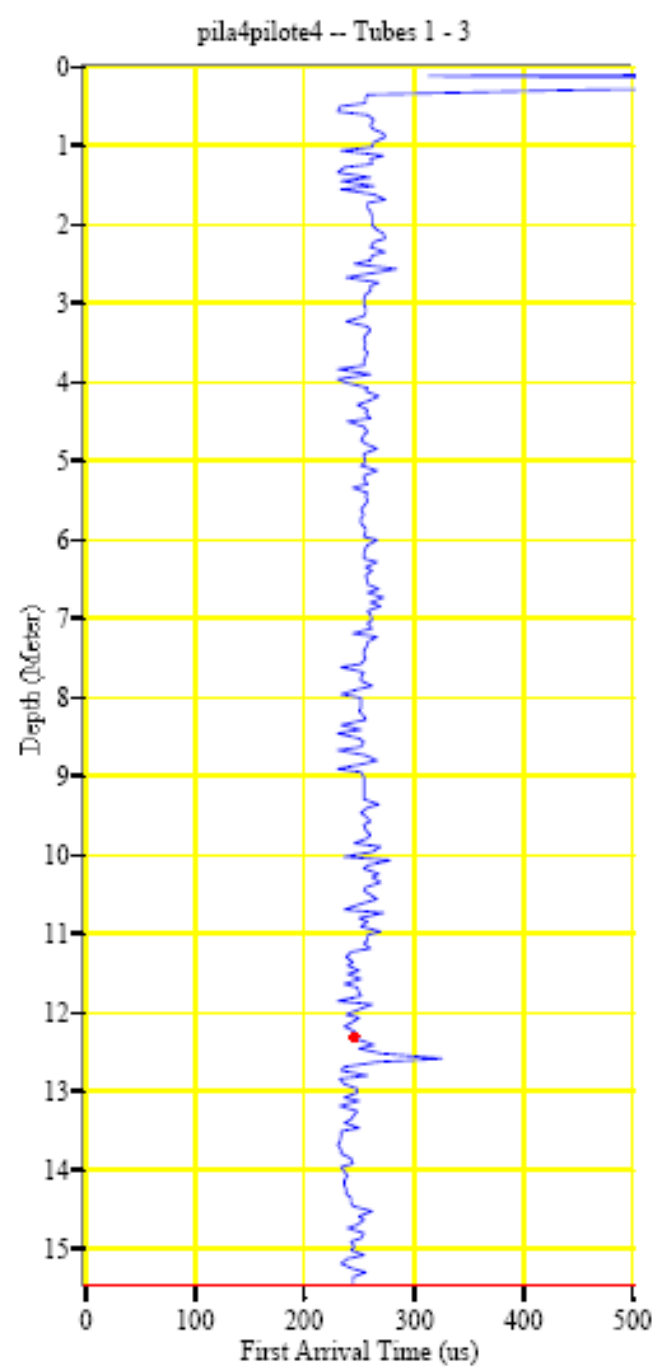
Pila 4 Pilote 4

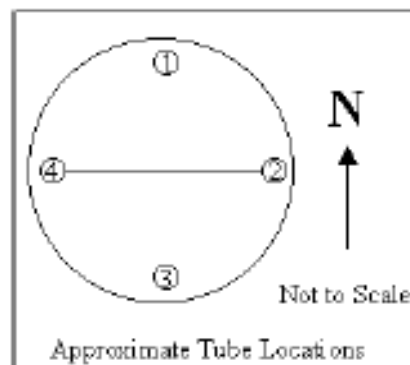
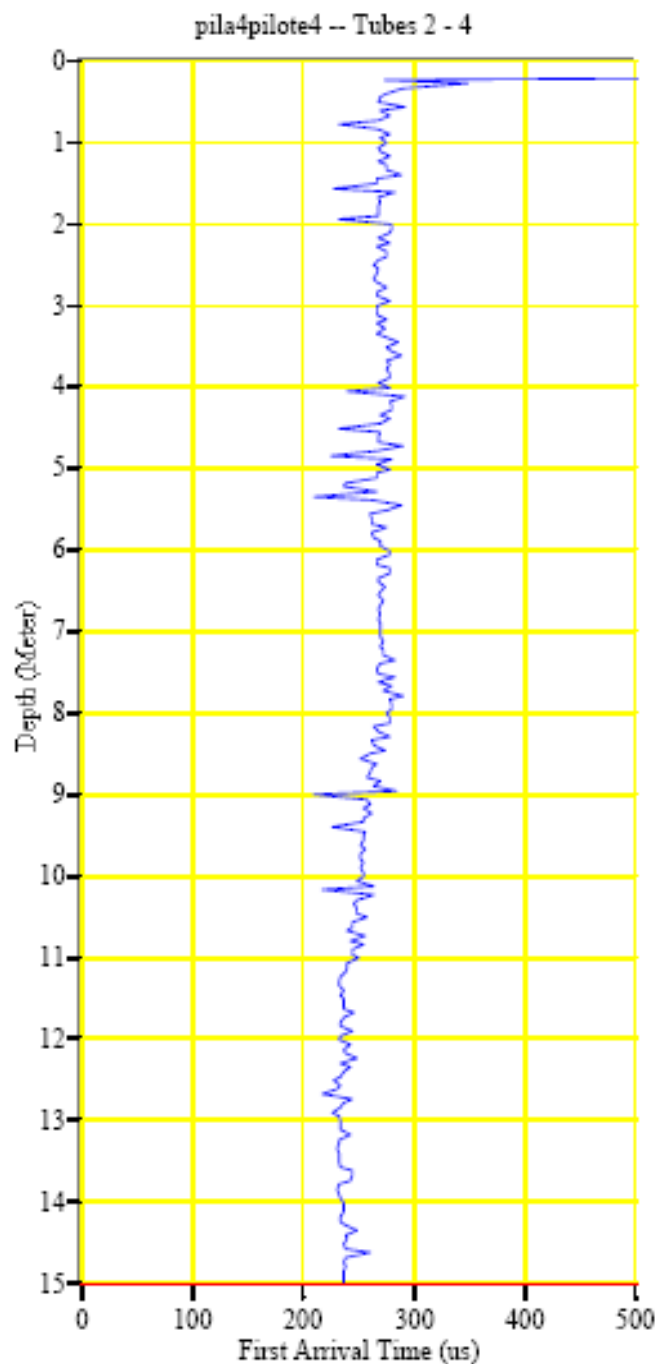








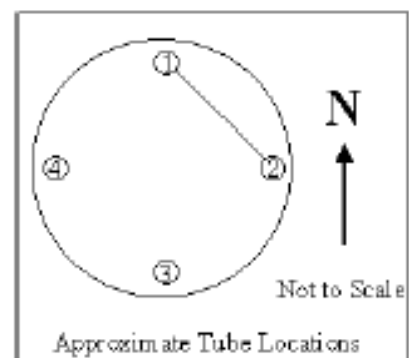
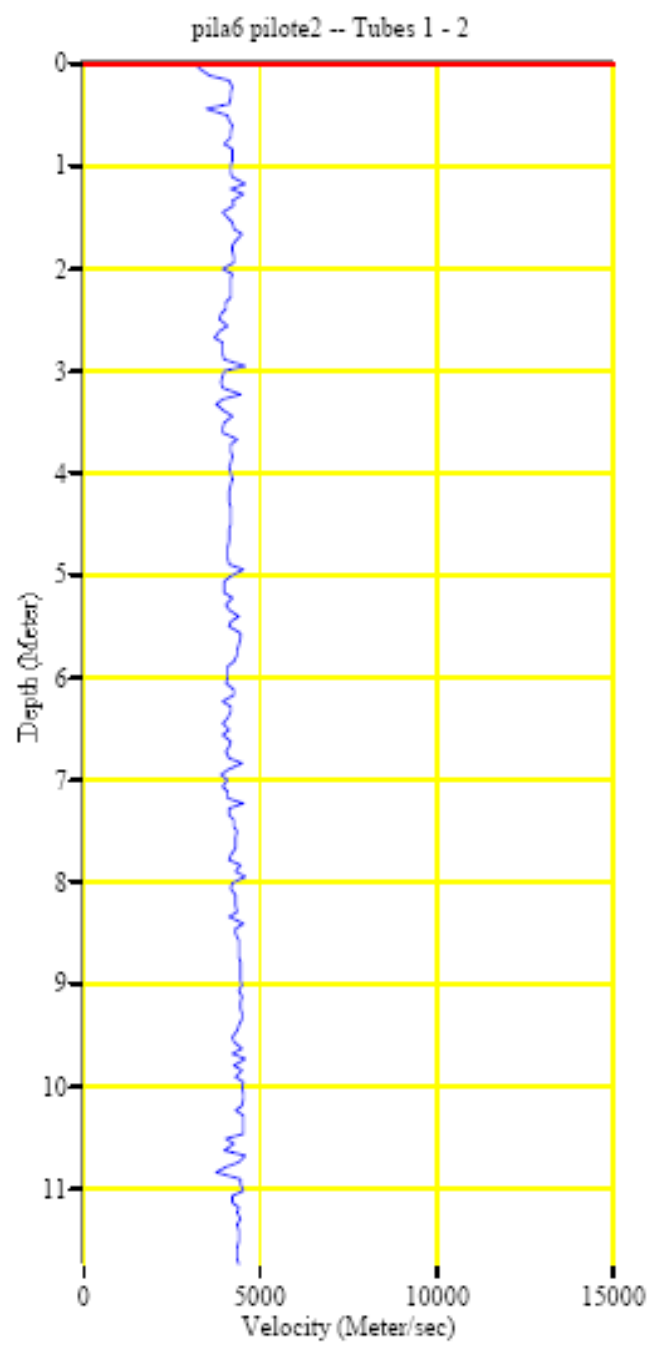


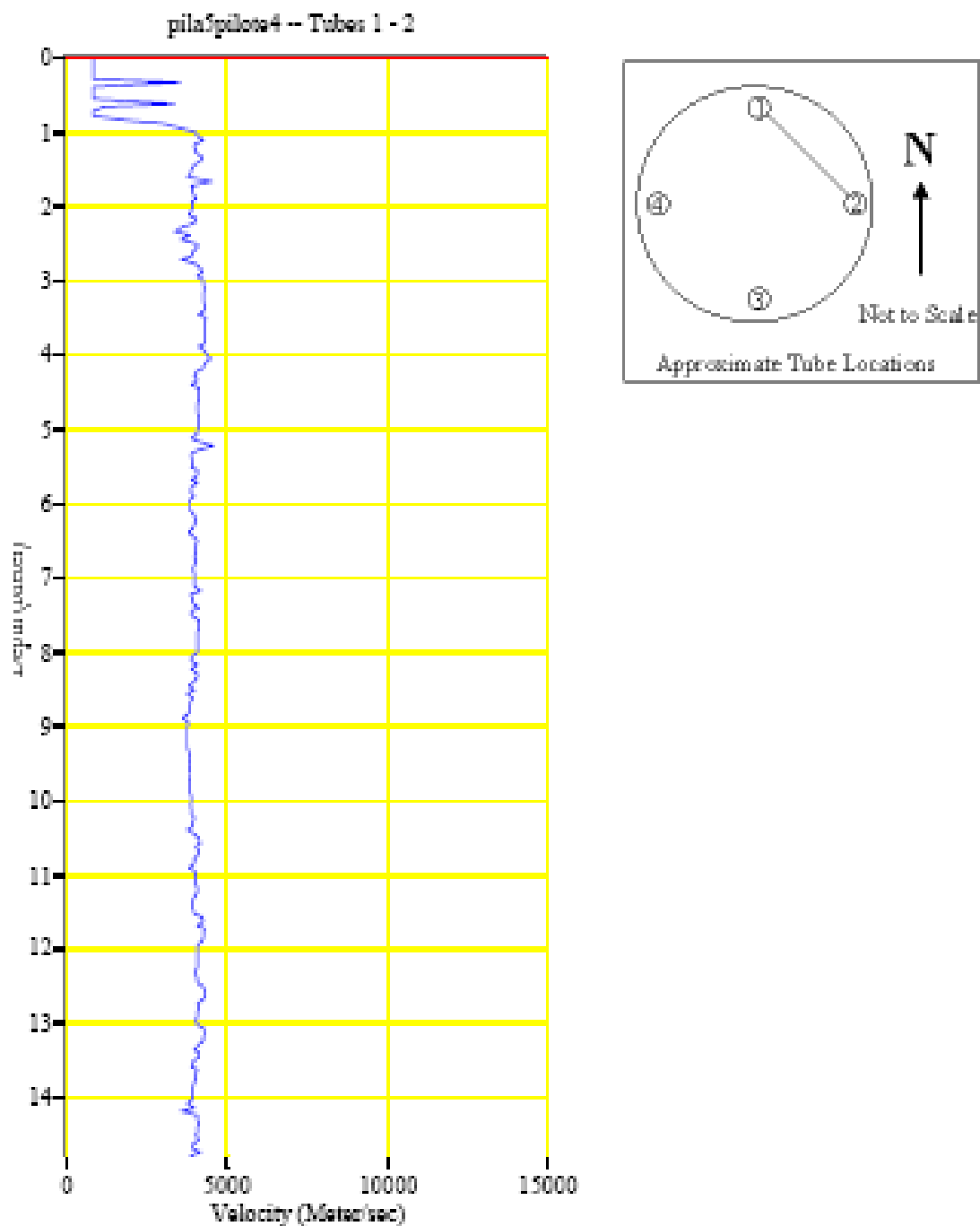


De la misma forma se le pidió a CEMOSA que diera los resultados de velocidad de propagación para cada par de tubos.

Los resultados obtenidos varían entre 3700 m/s y 4200 m/s tal y como se grafía seguidamente para dos de los cross-hole de dos pilotes.

En los defectos obtenidos las velocidades bajaban incluso por debajo de los 1000 m/s.

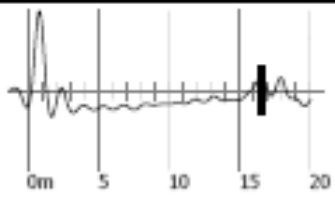
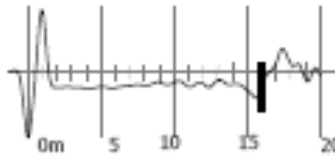
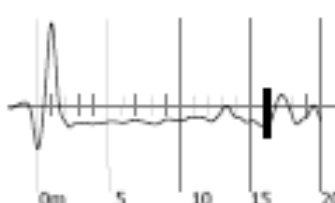




Resultados por el método de impedancia.

De los ensayos de los pilotes por el método de impedancia se obtuvieron los reflectogramas correspondientes, para la longitud del pilote restando el descabezado superficial de los mismos.

En el gráfico siguiente se aportan dichos reflectogramas.

Pilote	Longitud (m)	Detalles	Reflectograma	Observaciones
L 4. El Pila 2 P2	16.5m	04/03/2008 V:4000m/s Amp:170		Estrechamiento a 2,40 m. Se detecta la punta. Suciedad en la cabeza. Mal descabezado
L 6. El Pila 3 P2	15.6m	04/03/2008 V:4000m/s Amp:65		Suciedad en la cabeza
L 7. El Pila 4 P4	15.8m?	04/03/2008 V:4000m/s Amp:200		Estrechamiento a 13,30 m. Mal descabezado. Suciedad en la cabeza

De los pilotes que se han ensayo se interpretan anomalías en las siguientes gráficas:

PILA 2 PILOTE 2: estrechamiento a 2,4 m de profundidad aunque se observa continuidad hasta la punta del pilote.

PILA 4 PILOTE 4: estrechamiento a 13,30 m de profundidad, aunque se aprecia la punta del pilote.

Análisis comparativo de resultados por sendos métodos.

Como ha podido observarse existen discrepancias entre los resultados de sendos métodos, por lo que procedemos a comentarlas pilote a pilote:

- PILA 2 PILOTE 2: según el reflectograma de impedancia el error se sitúa a 2,4 m de profundidad; según el ensayo sónico para ningún par de tubos se detecta error a esa profundidad más el descabezado. De la misma forma analizando el reflectograma no se detecta el error obtenido en los sónicos en la punta del pilote, a unos 14 – 14,5 m de profundidad. El error detectado en el ensayo de impedancia puede deberse a la propia irregularidad en la cabeza del pilote, debido al descabezado practicado.
- PILA 3 PILOTE 2: en el reflectograma no se aprecia error alguno; en el sónico recordemos que se apreció una intrusión a 12,5 m de profundidad.
- PILA 4 PILOTE 4: En este caso se detecta un error en ambos ensayos: en el de impedancia a 13,3 m y en el sónico a 12,4 m que sumando el descabezado resultan aproximadamente coincidentes.

Del análisis comparativo anterior pueden obtenerse las siguientes conclusiones:

- El ensayo de impedancia por lo general detecta errores graves en los pilotes, con una afección importante a la sección estructural del pilote. Oquedades pequeñas respecto a la sección del pilote puede no detectarlas, (PILOTE 2 de la PILA 3).
- En el ensayo de impedancia influye la focalización de la onda de compresión, respecto de la vertical donde se produce el fallo, (PILOTE 4 de la PILA 4)
- La limpieza y la regularidad del descabezado del pilote tienen gran influencia en los resultados del ensayo de impedancia, (PILOTE 2 de la PILA 2).

Análisis retrospectivo. Obtención de resultados en base a la auscultación realizada.

En base a los resultados obtenidos pueden obtenerse conclusiones interesantes como las que siguen:

- Correlación de las gráficas de velocidad con la edad del hormigón de los pilotes.

Los ensayos sónicos sobre los pilotes se elaboraron entre 15 y 28 días después del hormigonado de los pilotes. Si observamos las gráficas de velocidad de las ondas en los ensayos sónicos veremos que la media de éstas oscilan entre los 3700 y los 4200 m/s.

La resistencia de los hormigones ensayados correspondiente a los pilotes ha oscilado entre 25,5 y 29,5 N/mm² a 7 días y entre 34,5 y 42,3 N/mm² a 28 días.

El kn de la planta según EHE se consideró de 0,9, ya que la resistencia prevista debía corresponder a 28 días a 25 N/mm².

Con la aproximación:

$$V^2 = E (1-\mu) / 2\rho (1+\mu) (1-\mu)$$

para las velocidades medias obtenidas se obtienen aproximadamente los siguientes módulos de deformación:

Para v 3700 m/s: E= 289.166,33 kg/ cm², 28.349,64 N/mm²

Para v 4200 m/s: E= 372.600 kg/cm², 36.529 N/mm²

Considerando **$E_{0j}=10.000 (f_{cm,j})^{1/3}$**

Obtenemos:

$f_{cm,j}$ = de 22,78 N/mm² a 48,7 N/mm².

Esta correlación, (aunque sólo sirva para observar como la velocidad aumenta para los pilotes de mayor edad), en general no es rigurosa; la razón es la siguiente:

- Se consideran valores de densidad y coeficiente Poisson constantes.
- No existe un buen acoplamiento de emisor y receptor en ningún caso con el hormigón del pilote.

- Repercusión sobre la resistencia estructural de los tubos de ensayo sónico y de las oquedades detectadas.

Para este análisis se ha reproducido la comprobación a rotura del pilote 2 de la pila 2, sobre la sección original sin daños y sin tubos sónicos, sobre la sección con tubos sónicos, y sobre esta última con la oquedad detectada. Con bastante aproximación y en base a los pares de tubos ensayados se puede localizar la dimensión de la coquera. Los resultados han sido los siguientes:

- Sección original de proyecto:

Cálculo de comprobación a rotura.
=====

Hipotesis de carga 1

N = 606.000 Mx = 153.000 My = 0.000

Esfuerzos últimos proporcionales a los de cálculo:

Nu = 1810.077 Mxu = 456.603 Myu = 0.072

Coef. Seguridad = 2.98693

Fibra neutra	:	Angulo con eje 'x'	=	0.00 s
		Interseccion con eje 'y'	=	-0.392 m
		Curvatura	=	0.00307 m-1
Contorno principal:		Def. max.=0.00350	Tens. max.=	144.56 Kp/cm2
		Def. min.=-0.00110	Tens. min.=	0.00 Kp/cm2
Armadura pasiva	:	Def. max.=0.00334	Tens. max.=	4436.52 Kp/cm2
		Def. min.=-0.00094	Tens. min.=	-1923.91 Kp/cm2

- Sección original y tubos de ensayo sónico, (sin considerar colaboración de acero de los tubos).

Cálculo de comprobación a rotura.
=====

Hipotesis de carga 1

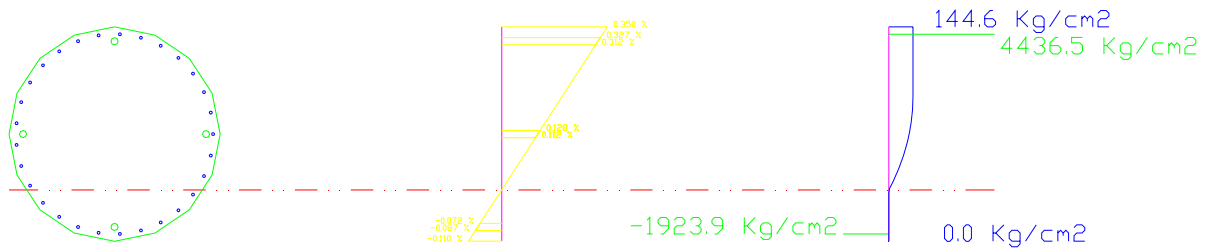
N = 606.000 Mx = 153.000 My = 0.000

Esfuerzos últimos proporcionales a los de cálculo:

Nu = 1802.472 Mxu = 454.757 Myu = 0.072

Coef. Seguridad = 2.97438

Fibra neutra	:	Angulo con eje 'x'	=	0.00 s
		Interseccion con eje 'y'	=	-0.392 m
		Curvatura	=	0.00307 m-1
Contorno principal:		Def. max.=0.00350	Tens. max.=	144.56 Kp/cm2
		Def. min.=-0.00110	Tens. min.=	0.00 Kp/cm2
Armadura pasiva	:	Def. max.=0.00334	Tens. max.=	4436.52 Kp/cm2
		Def. min.=-0.00094	Tens. min.=	-1923.91 Kp/cm2



- Sección original, tubos sónicos y oquedad.

Cálculo de comprobación a rotura.
=====

Hipotesis de carga 1

N = 606.000 Mx = 153.000 My = 0.000

Esfuerzos últimos proporcionales a los de cálculo:

Nu = 1609.360 Mxu = 405.569 Myu = -0.271

Coef. Seguridad = 2.65571

Fibra neutra : Angulo con eje 'x' = 3.52 º

Interseccion con eje 'x' = 7.128 m

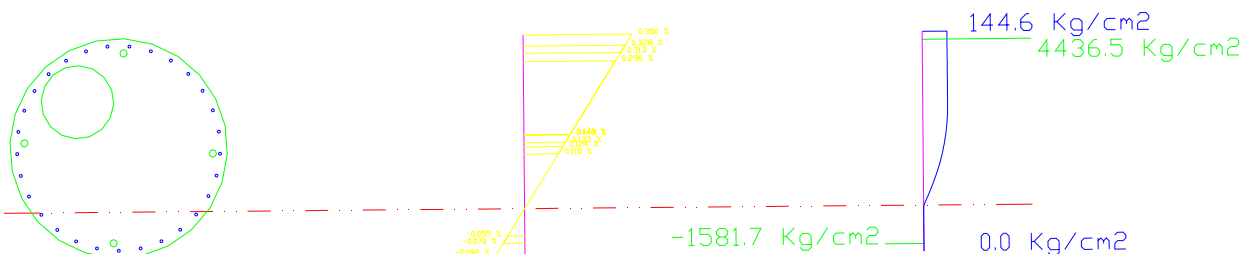
Curvatura = 0.00295 m-1

Contorno principal: Def. max.=0.00350 Tens. max.= 144.56 Kp/cm²

Def. min.=-0.00092 Tens. min.= 0.00 Kp/cm²

Armadura pasiva : Def. max.=0.00334 Tens. max.= 4436.52 Kp/cm²

Def. min.=-0.00078 Tens. min.=-1581.68 Kp/cm²



Como principales conclusiones tenemos:

- La instalación de los tubos sónicos apenas repercute en la resistencia del pilote.
- Los pilotes se habían calculado con el coeficiente de seguridad muy alto por lo que a pesar de la oquedad éste sigue siendo superior a 2,5.
- La merma en las resistencia del pilote es inferior al 5% por la oquedad detectada.

Costes de los ensayos.

Debe matizarse en este sentido que el verdadero coste de los ensayos sónicos radica en los propios tubos de acero con un valor muy superior al del propio ensayo. Para la cimentación del viaducto el coste real de los ensayos se situó en el entorno de los

18.000,00 € es decir aproximadamente el 7% de los costes de la cimentación. En este proyecto como en muchos otros el coste de los ensayos sónicos suele estar infravalorado ya que no se incluye el propio coste de los tubos, sólo el de los ensayos propiamente dichos.

El coste de los ensayos de impedancia, sin embargo, no llegó a los 1.500,00 €

4. OTROS CASOS DE APLICACIÓN.

El caso analizado de la cimentación de un puente, no es suficiente para obtener una buena perspectiva en el estudio comparativo entre los dos métodos de auscultación, ya que de acuerdo a lo visto parece claro que siempre deberían realizarse ensayos sónicos por el método de cross-hole, en base al mejor conocimiento de la ejecución de los pilotes que nos proporciona.

Vamos a analizar brevemente otros casos, bien distintos.

Urbanización Interior RI-2 de la Alcaidesa.

En este caso nos referimos a una obra con una importante pantalla de pilotes. Seguidamente describimos sencillamente la obra:

Se trata de la urbanización interior de la parcela RI-2 de la Alcaidesa en San Roque, (Cádiz). Sobre una parcela muy escarpada con pendientes medias del 45 % de proyectaron un conjunto de 240 viviendas de lujo en 20 bloques. La geología de la parcela era muy complicada correspondiendo al Flysch del Campo de Gibraltar; en dicha parcela alternaban estratos rocosos con otros muy blandos, se detectaban algunos deslizamientos pequeño y locales. El proyecto de arquitectura incluía la urbanización interior del espacio con la formación de terrazas con muros de tierra armada; esta solución no sólo era inviable, incluyendo la cimentación por losas de los edificios gravitando sobre la tierra reforzada, sino que la propia empresa Tierra Armada S.A. se negó a ejecutar semejante solución. Además quedaban sin resolver algunos problemas de tipo geotécnico. En esta situación se nos contrató la redacción de un nuevo proyecto de urbanización que hiciera viable la ejecución de la edificación.

Se redactó así un proyecto que incluía la formación de terrazas en base a los siguientes criterios:

- Los movimientos de tierras y en general los vaciados debían seguir una secuencia estricta de ejecución evitando descalses en las terrazas superiores.
- Para consolidar las terrazas se empleaban muros de muy diversas tipologías: muros ménsula, muros de bandejas de hasta 17 m de altura, muros de gravedad y en la parte más alta de la urbanización se previeron dos muros de pilotes de 650 m de longitud y un total de 550 pilotes.

El coste de las medidas anteriores incrementaba el presupuesto en 8 millones de euros.

Para el muro de pilotes se propuso la auscultación por el método de ensayo sónico por el método de Cross-hole; sin embargo, el coste estimado de los ensayos sónicos suponía aproximadamente el 11 % del coste de la pantalla de pilotes, por lo que la Promotora decidió la aplicación del método de auscultación por impedancia. El diseño de la pantalla de pilotes se hizo con criterios exigentes de cálculo en los estados límite de servicio y de las terminaciones previstas ya que lindaba con un pasillo peatonal de acceso a parte de los edificios. Por otro lado la ejecución de la pantalla era compleja ya que se alternaban estratos subverticales de roca arenisca y caliza con estratos blandos, debiendo emplear en algunos casos trépano. En esta situación para el cálculo de la pantalla de pilotes se siguió el criterio de considerar el fallo de uno de cada cuatro pilotes bajo la viga de coronación; de esta forma las necesidades de auscultación resultaban menos exigentes. El coste de la auscultación finalmente fue inferior al 1% del coste de la pantalla de pilotes.

Variante Exterior de Palma del Río.

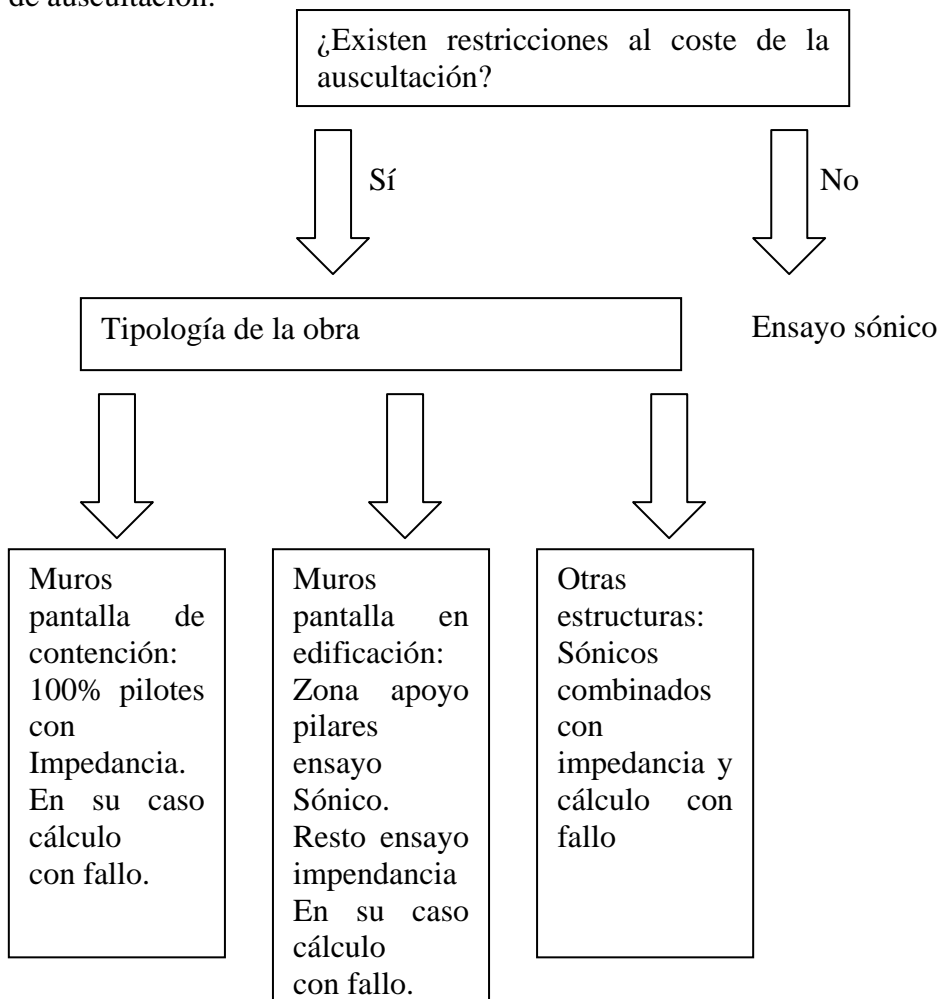
En este caso el proyecto incluyó un gran viaducto en la margen derecha del Río Guadalquivir y un puente arco atirantado sobre el Río Guadalquivir. El hormigón de los pilotes de uno de los encepados del viaducto dio problemas debido al error en la dosificación de uno de los aditivos; como consecuencia la resistencia del hormigón fue de 4 N/mm² en lugar de lo 30 N/mm² que estaban previstos. Curiosamente el hormigón en la coronación de los cuatro pilotes ya no presentaba este error por lo que su aspecto no delataba el fallo producido; además las probetas para los ensayos de resistencia se configuraron con hormigón no defectuoso. La auscultación de los pilotes se hizo con ensayo sónico y detectó el fallo producido con gran claridad. Posteriormente se picó el pilote y se observó que el hormigón a dos metros de profundidad no presentaba cohesión alguna, tomándose muestras para su ensayo. Esta situación obligó a redefinir el encepado con nuevos pilotes más externos.

Pilotes en muros pantallas de sótanos de edificación.

Se han proyectado numerosas estructuras de edificación con muros pantallas sobre los que se apoyan los pilares de los edificios. En este caso a nivel de proyecto se ha previsto la auscultación de la pantalla de pilotes en la vertical de los pilares con ensayo sónico y en el resto de pilotes con ensayos de impedancia. Además se han adoptado medidas conservadoras en el cálculo considerando posibles fallos en la ejecución de los pilotes.

5. CRITERIOS DE APLICACIÓN. ANÁLISIS COMPARATIVO.

En base al análisis anterior se propone el siguiente cuadro de decisión sobre el método de auscultación:



6. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES.

Como conclusiones del estudio realizado podemos establecer las siguientes:

- La auscultación con ensayo sínico por el método de cross-hole permite conocer con mayor detalle la ubicación de los fallos en la ejecución de los pilotes.
- La auscultación por impedancia por lo general sólo permite detectar fallos importantes en la sección, no detectando en algunos casos fallos parciales o locales en los mismos.
- El coste del ensayo sínico es muy superior al de impedancia.
- Cuando no se pueda aplicar una buena auscultación de los pilotes se deben considerar hipótesis de fallo en el cálculo de la cimentación.

Salvador Mansilla Vera.
Abril 2008.