



ugr

Universidad
de Granada

“Ensayos de integridad mediante Evaluación No Destructiva de pilotes hormigonados in situ”

Estudiantes:

Carolina Aranda Caballero
William Escobar Jara

Profesor:

Guillermo Rus Carlborg

Asignatura:

Evaluación no destructiva del daño y calidad de
estructuras

Febrero 2010, Granada – España.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años las técnicas de control de cimentaciones se han implementado de manera fuerte en España, encontrándose en grandes obras y en la mayoría de los proyectos de cimentaciones profundas. Sin embargo, en general la información y conocimiento que se posee, tanto de sus ventajas y desventajas, en cierta medida es escasa y desconocida.

Debido a lo expuesto, es necesario difundir y explicar adecuadamente los distintos métodos, los principios en que se basan y las limitaciones. Para esto nos centraremos en la técnica de pilotes.

La motivación para realizar ensayos en los pilotes puede ser muy variada, entre algunas de estas son las siguientes:

- a) estimar los parámetros de cálculo
- b) estimar la capacidad portante
- c) probar las características resistente-deformacionales en el rango de las acciones especificadas.
- d) comprobar el cumplimiento de las especificaciones
- e) probar la integridad del pilote.

Mientras que los métodos de la manera de llevarlos a cabo puede ser muy distinto uno de otro, pudiendo consistir en:

- a) ensayos de carga estática (Por escalones de carga o a velocidad de penetración constante)
- b) ensayos de carga dinámica (o de alta deformación)
- c) ensayos de control
- d) ensayos de integridad

Los distintos métodos de ensayo se caracterizan por:

- La fuerza aplicada al pilote o pantalla de hormigón (magnitud y tiempo de aplicación) y por,
- La deformación inducida.

Los ensayos que desarrollan “fuerzas elevadas durante largos periodos de tiempo”, tales como los ensayos de cargas estáticas, se utilizan para obtener la capacidad de carga, mientras que los ensayos de pequeña energía y baja deformación se emplean para determinar la integridad de la pantalla. En ensayos de alta deformación semiestáticos y dinámicos, aunque la fuerza desarrollada es comparable a la correspondiente a ensayos de carga estática, el tiempo de aplicación es mucho más corto.

II. DESARROLLO.

En el presente trabajo, nos centraremos en los “*ensayos de integridad*”, mediante Evaluación No Destructiva (END) de pilotes y pantallas hormigonadas “in situ” que se emplean actualmente en España y en muchos otros países, siendo los siguientes:

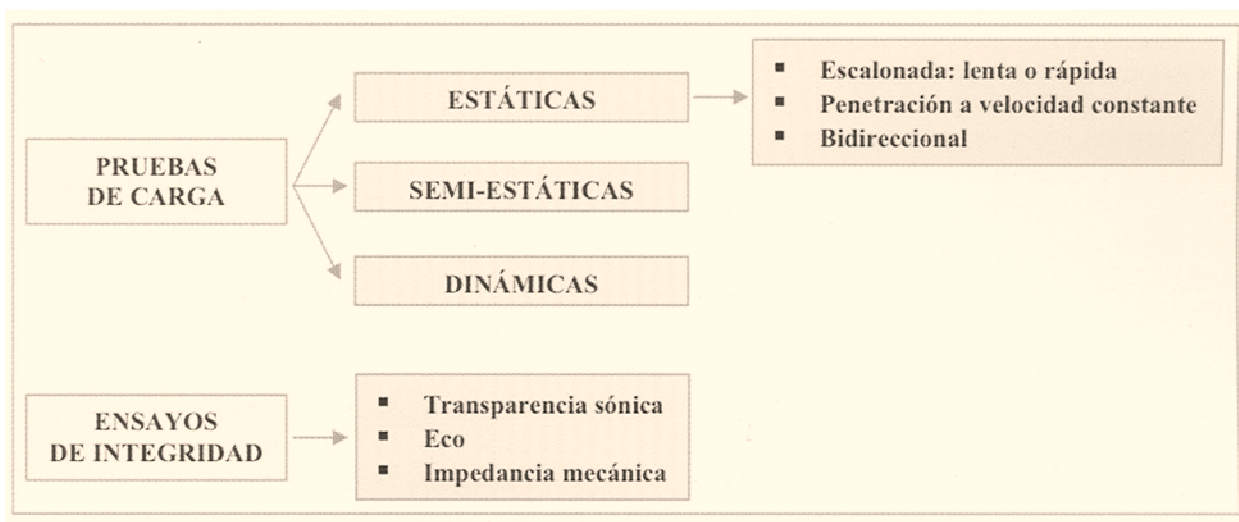
- a) ensayos de eco o sónicos por reflexión y por impedancia, o de baja deformación;
- b) ensayos sónicos por transparencia, o cross-hole sónicos.

Si bien, los “*ensayos de integridad*” tienen por objeto verificar la continuidad del fuste del pilote y la resistencia mecánica del hormigón, donde se pueden incluir a los ensayos con alta deformación del pilote como son los ensayos de carga estática y dinámica, no serán incluidos, ya que puede ser considerado como Ensayos Destructivos, los que no cumplen la característica fundamental de conservar la integridad del pilote.

De modo de comprender cómo es el funcionamiento que tienen los END en pilotes y pantallas de pilotes hormigonadas in situ, es necesario conocer de forma general las características de construcción y materialidad para saber de qué se está hablando a lo largo del trabajo. (Ver Anexo A).

1. TIPOS DE ENSAYOS.

Las técnicas de control se pueden clasificar de la siguiente manera:



Se describen a continuación las características principales de los diferentes tipos de ensayos en pilotes y pantallas de hormigón in situ:

1.1. Pruebas de carga

1.1.1. Estáticas.

a) *Prueba de carga estática Escalonada.* Consiste en someter a la pantalla a esfuerzos de forma escalonada y creciente. Cada etapa de carga debe mantenerse constante durante un cierto tiempo, o hasta que el asiento haya virtualmente terminado o alcanzado el límite prescrito. El ensayo permite medir el asiento empleando los dispositivos de auscultación instalados en el pilote, los cuales están vinculados a una viga de referencia situada a una distancia razonable. El análisis posterior de los datos permite obtener la capacidad resistente del elemento de cimentación.

La duración para ensayos lentos es entre 24 y 48 horas, y los ensayos rápidos que no consideran el tiempo de preparación pueden durar entre 3 y 5 horas.

El método de cargas escalonadas es el más indicado para obtener el comportamiento carga-asiento de un pilote sometido a cargas de hasta 1.50 veces la sollicitación de trabajo.

b) *Prueba de carga de Penetración a velocidad constante.* Consiste en que el pilote es forzado a penetrar el terreno a velocidad constante, midiendo la fuerza necesaria para ello. El ensayo se mantiene hasta que se alcanza la carga de prueba o el fallo del pilote. La diferencia con el ensayo anterior es la forma de aplicación de la carga.

La duración del ensayo no suele ser inferior a 24 horas, sin considerar la preparación de la prueba.

El ensayo es especialmente útil en suelos cohesivos, en los que los pilotes funcionan principalmente por fuste.

1.1.2. Semiestáticas

Se aplica la fuerza de compresión al pilote durante un periodo de tiempo muy corto (pruebas rápidas), del orden de 100 ms. El sistema de aplicación de la carga consiste en una cámara de combustión en la que se produce la ignición controlada de combustible.

La instrumentación se basa en dos dispositivos: una célula de carga que mide directamente la fuerza aplicada y un sensor de desplazamientos por láser colocado en la cabeza del pilote. La longitud de la onda de presión generada en este tipo de ensayos es lo suficientemente larga para recoger todo el pilote, por lo que no se necesita un análisis complejo de la ecuación de onda a la hora de interpretar los resultados. Por el contrario, al igual que en los ensayos dinámicos, los efectos de fluencia y disipación de presiones intersticiales pueden tener influencia en la prueba, aunque en menor medida, debido a que la carga es menor. El sistema permite obtener de manera instantánea la curva carga-deformación.

El espacio de trabajo requerido es función de la magnitud de la carga de prueba. El método es rápido y permite realizar un gran número de ensayos al día.

1.1.3. Prueba de carga Dinámicas.

Los métodos dinámicos se basan en el estudio de la respuesta del pilote al golpeo en su cabeza con un martillo. Para llevar a cabo estos ensayos se precisa un martillo de impacto que debe tener unas características acordes con el tipo de pilote que se va a ensayar, de forma que se movilice completamente la capacidad dinámica del pilote. En pilotes prefabricados puede utilizarse el mismo martillo de instalación, mientras que en pilotes in situ se requiere un martillo independiente.

El pilote se instrumenta en cabeza con acelerómetros y extensómetros.

Debido a la forma de aplicación de las cargas, los ensayos dinámicos no pueden tener en cuenta algunos efectos relacionados con el tiempo, como la consolidación, relajación o fluencia. Por tanto, el análisis de datos debe ser muy cuidadoso, y se recomienda contrastar siempre los resultados con la experiencia en terrenos de características similares.

Las técnicas dinámicas ofrecen rendimientos muy elevados: un ensayo dinámico puede realizarse en 15 minutos en un pilote prefabricado, y en 30 minutos, en un pilote in situ.

1.2. **Ensayos de Integridad.**

Los ensayos de integridad de pilotes suministran información sobre las dimensiones físicas, la continuidad o la consistencia de los materiales empleados en los pilotes, pero en ningún caso entregan información directa sobre el comportamiento de los pilotes en condiciones de carga. Por tanto los ensayos de integridad mediante evaluación no destructiva son una herramienta útil para determinar la calidad aproximada del hormigón endurecido, “en ningún caso reemplazan a los destructivos”, ya que estos pueden entregar información del comportamiento sometidos a carga, o sea su resistencia mecánica.

En el caso de estructuras de dudosa calidad, ya sea afectada por esfuerzos o ataques de elementos agresivos al hormigón, se suele aplicar la técnica de evaluación no destructiva con el fin de realizar un diagnóstico preliminar del elemento en estudio, significando una potente herramienta de trabajo para poder determinar experimentalmente la existencia de defectos en los pilotes con rapidez y economía, por lo que son empleados básicamente como control de calidad generalizado de los pilotes.

Efectuado el ensayo de integridad mediante END y detectadas anomalías, es posible investigar sólo las zonas con mayor daño mediante técnicas destructivas o de carga, y así poder emitir una opinión más fundada sobre la estructura y determinar si el o los pilotes son aptos para el uso que se pretende.

Los resultados de la END deben ser interpretados por personal experimentado puesto que se pueden identificar defectos con menor importancia que no afectan gravemente al pilote, por lo que es fundamental la experiencia para una mejor interpretación.

En general se podría decir, que los ensayos no destructivos son la etapa previa de los ensayos destructivos o de carga.

El número de ensayos depende de cada proyecto. Sin embargo, se establece en la CTE DB-SE C el número mínimo siguiente:

- a) con carácter general: 1 por cada 20 pilotes
- b) pilotes aislados con diámetros entre 45 y 100 cm: 2 por cada 20 pilotes
- c) pilotes aislados con diámetro superior a 100 cm: 5 por cada 20 pilotes

Se trata de frecuencias de muestreo muy bajas, que no son las habituales admitidas internacionalmente. En cimentaciones pilotadas el CTE está especificando solo un 5% de pilotes ensayados, mientras que internacionalmente se especifica un mínimo de un 30%. Y aún así se trata de un muestreo escaso, ya que lo usual es ensayar el 100%, al menos con el método sónico con martillo de mano. Ello es debido a que los fallos en la ejecución de los pilotes no suelen ser de carácter generalizado, que son los que se detectan con un muestreo, sino que suelen ser puntuales en algún pilote que, por motivos variados, haya quedado mal ejecutado; pero estos fallos no se detectan con un muestreo, y menos si es un muestreo muy somero. Además, el costo de los ensayos es casi el mismo en un muestreo pequeño que en un control total, ya que los ensayos sónicos con martillo de mano son muy rápidos de ejecutar, lo que hace que el incremento de costo por ensayar más pilotes en un mismo desplazamiento del técnico especialista a obra sea pequeño comparado con el beneficio de ensayar todos los pilotes.

Las nomenclaturas que se emplean son muy variadas y contradictorias tanto en la literatura técnica, como en la publicidad de las empresas suministradoras y las dedicadas a la realización de ensayos. Por lo que es común que se utilicen palabras como “sónico”, “sísmico” y “dinámico” con diferente significado según los autores, por tanto los nombres que se usan en este trabajo es posible que no coincidan con los que aparezcan en otros escritos.

Los ensayos de integridad, mediante Evaluación No Destructiva (END) de pilotes más difundidos son:

1.2.1. Transparencia sónica o método ultrasónico “Cross-hole”.

El método de “transparencia sónica” es el método más usual para el control de la integridad aplicados en pilotes, pantallas continuas o módulos de pantalla aislados, realizados in situ.

Este consiste en registrar el tiempo que tarda una onda ultrasónica o de presión (llamada comúnmente onda sónica) en propagarse desde un emisor a un receptor que está colocado en posiciones conocidas, que se desplazan simultáneamente por dos tubos paralelos sujetos a la armadura del pilote, a lo largo de todo el fuste 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.

Los datos son almacenados de manera digital en el equipo, y las gráficas pueden ser impresas directamente en obra o revisadas e impresas en gabinete.

En las Figuras nº 1 y nº 2 se puede ver un esquema de funcionamiento.

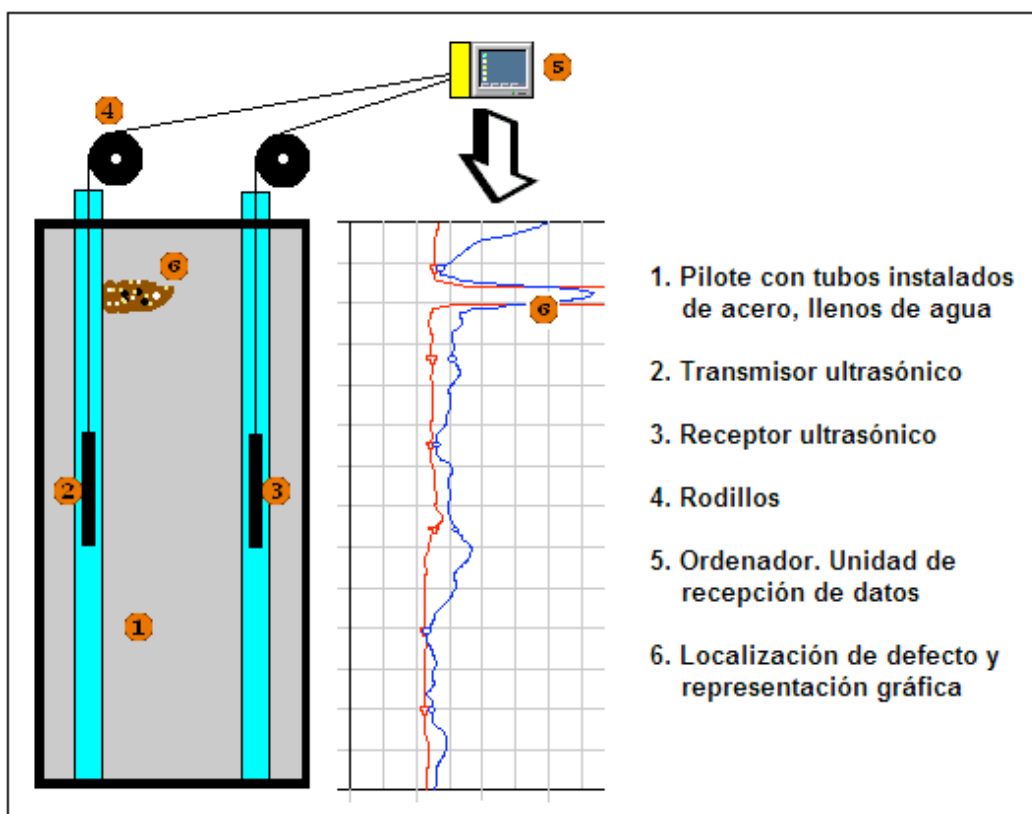


Figura nº 1. Esquema del Ensayo Transparencia sónica con dos tubos embebido en pilote.

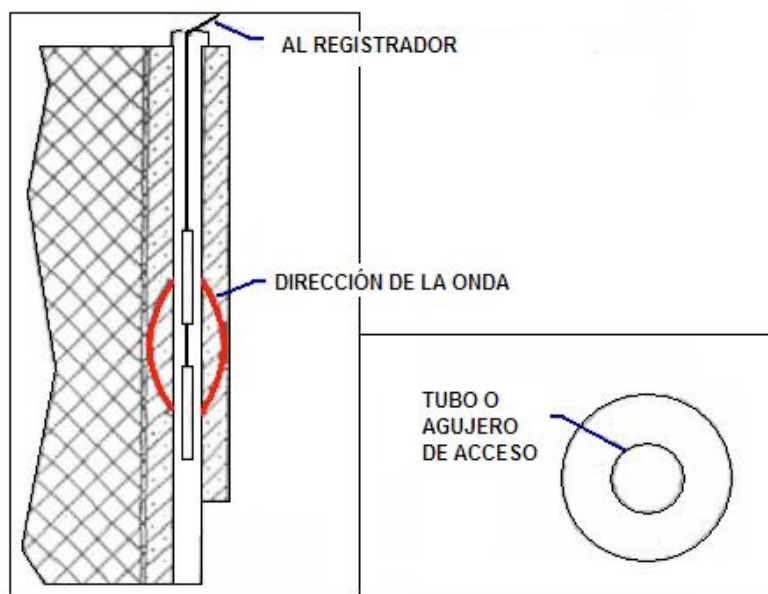


Figura nº 2. Ensayo Transparencia sónica con un solo tubo embebido en el pilote.

Los ensayos de transparencia sónica se realizan frecuentemente según la normativa NF P 94-160-1¹ o la norma ASTM D 6760-02².

Este ensayo es posible aplicarse en todos los tipos de cimentaciones de hormigón armado instrumentadas previamente con tubos metálicos para el control de integridad.

En el caso de realizarse ensayos en la totalidad de los pilotes, o en un muestreo significativo, las cargas admisibles por razón estructural de los pilotes se pueden incrementar en un 20%, de acuerdo con la norma francesa de pilotes DTU 13.2³, o en un 25% según el Código Técnico de la Edificación⁴.

Para efectuar los ensayos de Transparencia sónica o método ultrasónico Cross-Hole es necesario y adecuado tener lo siguiente:

a) Aparato utilizado.

El equipo del ensayo de transparencia sónica está formado por:

- *“Unidad central con funcionamiento a batería, pantalla, impresora y capacidad de almacenamiento digital de datos”.* Los datos son presentados en la pantalla de manera gráfica, con eje del tiempo en horizontal (eje x) y de profundidad en vertical (eje y). El intervalo estándar de medidas será como máximo de 5 cm en vertical (*ver Anexo B*).

¹ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). "Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundation by Ultrasonic Crosshole Testing",

² AFNOR. "Sols: reconnaissance et essais. Auscultation d'un élément de fondation. Partie 1: Méthode par transparence". 1993.

³ AFNOR, norma P11-212, "DTU 13.2 Fondations profondes pour le bâtiment". Paris, 1992

⁴ MINISTERIO DE LA VIVIENDA. Código Técnico de la Edificación, Documento Básico SE-C Cimentaciones. España, 2009.

- “Emisor y receptor de ultrasonidos (sondas)”. Este debe tener longitud de cable suficiente para llegar al fondo de los tubos instalados. Además de tener capacidad de transmitir y recibir la señal al menos a través de 1,5 m de hormigón. Su diámetro máximo debe ser de 25 mm. La frecuencia mínima de trabajo del emisor y del receptor será de 50.000 Hz.
- “Poleas” para bajar las sondas por los tubos, donde por lo menos una de ellas debe estar instrumentada para poder conocer la profundidad a la que se encuentra la sonda con un error máximo del 2%.
- “Programa informático en ordenador” de capacidad suficiente para imprimir en impresora laser los gráficos de los ensayos, junto con los datos identificativos del mismo.

b) Operarios y personal capacitado para la realización de las pruebas e interpretación de los resultados).

Los ensayos en obra deben ser realizados por personal con experiencia en ensayos de integridad. Mientras que la interpretación de las gráficas y la redacción de los informes requieren de un profesional geotécnico con mayor experiencia en ensayos de integridad de pilotes.

c) Tubos embebidos.

Para la realización del ensayo es necesario que en los pilotes al momento de ser construidos se dejen instalados tubos, para poder introducir las sondas hasta la profundidad que se quiera ensayar (Figura nº 2).

Estos tubos tienen ciertos requisitos:

- Ser preferentemente de acero, capaces de aguantar la presión del hormigón fresco durante el hormigonado, de diámetro mínimo 40 mm y preferentemente 50 mm. Pueden utilizarse tubos de plástico en pilotes cortos, el inconveniente se debe a que es muy fácil que se deterioren durante el hormigonado y queden inservibles, además que no ofrezcan buena adherencia al hormigón (*ver Anexo B*).
- No es recomendable emplear tubos de mayor diámetro, 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 tubos se deben unir con firmeza a la armadura del pilote, con sujeciones adecuadas al menos a cada metro.
- Los empalmes deben efectuarse con manguitos roscados, ya que las uniones soldadas pueden provocar resaltes que dificulten el paso de las sondas o deterioren los cables.
- Los dos extremos de los tubos deben cerrarse herméticamente por medio de tapones metálicos roscados, 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. Estos deben sobresalir al menos 40 cm y no más de 150 cm del hormigón del pilote, o del terreno, si están enterrados en el momento del ensayo.

- Los tubos deben llenarse de agua dulce y limpia, previamente al hormigonado, o antes del inicio del fraguado como muy tarde, para asegurar una buena adherencia del hormigón al tubo cuando el hormigón se solidifique. Debe comprobarse que no tienen obstrucciones, ni se producen pérdidas de agua.

- El número de tubos por pilote recomendados a instalar depende del diámetro que tengan los pilotes:

Nº de tubos	Ø de pilote
2	2 tubos \leq 60 cm
3	3 tubos \leq 120 cm
4	4 tubos \leq 150 cm
5	5 tubos \geq 150 cm
Para grandes diámetros se coloca un tubo cada 30 cm de diámetro aproximadamente	

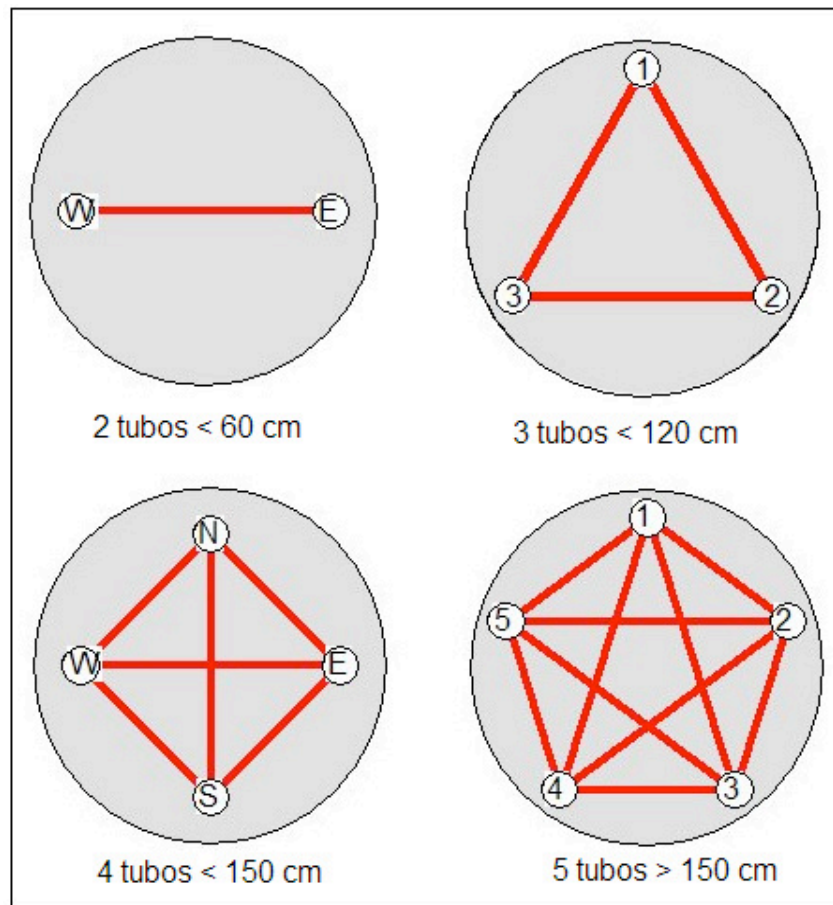


Figura nº 3. Disposición de Tubos embebidos

Realización del ensayo.

Para una adecuada realización del ensayo es recomendable disponer con la siguiente información: un plano con la identificación de los pilotes, longitud aproximada de cada uno de ellos, y posibles incidencias durante la construcción de estos (*ver Anexo B*).

Es importante que los pilotes estén accesibles y sin presencia de agua. Además que el hormigón no tenga, menos de una semana en el momento del ensayo.

Previo al inicio del ensayo de cada pilote, se debe pasar una plomada por cada tubo, medir su longitud, y comprobar la ausencia de obstrucciones. Además se debe comprobar que estén llenos de agua.

Cuando hay pilotes con cuatro tubos se realizan seis ensayos, cuatro en las parejas de tubos adyacentes y dos en las parejas de tubos diagonalmente opuestos.

El ensayo se realiza después de bajar las sondas hasta el fondo de los tubos, levantando ambas simultáneamente después de asegurarse de que están en el mismo plano horizontal.

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

d) Informe de resultados.

Para cada pareja de tubos en que se realiza el ensayo se entrega una gráfica (diagrafía) del perfil ensayado, como se muestra en la figura nº 4, el tiempo en las abscisas (eje x) que tardan en llegar las ondas ultrasónicas del emisor al receptor y la profundidad en ordenadas (eje y). También se puede incluir en la gráfica una curva que indique la energía relativa de la onda cuando llega al receptor.

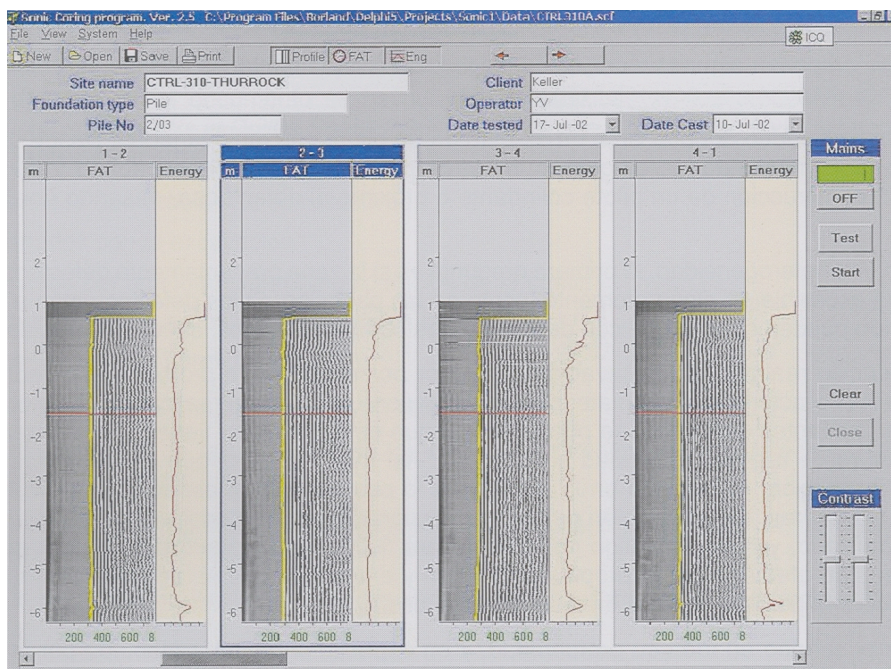


Figura nº 4. Digitalización y almacenamiento de la señal de Transparencia Sónica.

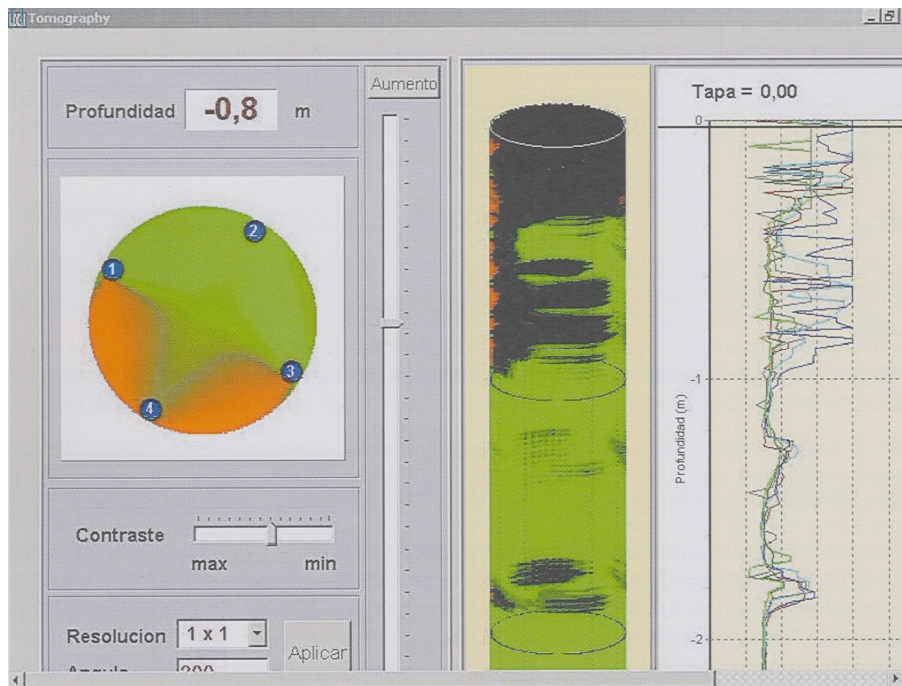


Figura nº 5. Representación 3D de las diagráfías moduladas de Transparencia Sónica donde la zona defectuosa se encuentra en negro.

e) Criterios de aceptación y rechazo.

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

Es necesario dar una interpretación evaluando los posibles fallos en el pilote, en el caso que uno o varios perfiles entre parejas de tubos presenten retrasos significativos o pérdidas de señal a una o varias profundidades. El número y posición de perfiles que tienen una determinada anomalía a una misma profundidad puede dar una indicación de la zona afectada. Para esto es adecuado contar con la información para una mejor realización del ensayo, para poder interpretar y concluir con una estimación de la gravedad del fallo en el pilote detectado.

f) Acciones correctoras.

En el caso de detectar pilotes con anomalías en las gráficas originadas por posibles fallos en el pilote pueden llegar a ser considerados como defectuosos o ser aceptados, según los requerimientos a que está solicitado el pilote.

Los pilotes defectuosos pueden ser reparados o sustituidos por otros. Aunque antes de adoptar cualquier decisión, los pilotes pueden ser sometidos a pruebas y ensayos complementarios, tales como pruebas de carga estáticas o dinámicas, sondeos con recuperación de testigo continuo, o excavación perimetral si los defectos no están a gran profundidad, ya que los END son ensayos que se emplean normalmente de manera preliminar a los otros tipos de ensayos.

1.2.2. Ensayo Sónico o de Eco o de Impedancia Mecánica.

Este ensayo se puede encontrar diferenciando el “Ensayo de Eco” del “Ensayo de Impedancia”, aunque se tratan frecuentemente juntos como técnicas basadas en el análisis de la respuesta dinámica del pilote provocado por una pequeña fuerza axial que se aplica en la cabeza mediante un martillo de mano, y es como se desarrollará en este trabajo de investigación. Este es el método que más se emplea internacionalmente. Es un método dinámico que induce a una baja deformación del pilote, denominándose generalmente "método sónico", aunque también se le nombra como "sísmico", "ensayo de integridad de baja deformación", "sonic echo" (en inglés) o "ensayo de impedancia mecánica". Sin embargo, se explicará resumidamente de forma separada el “ensayo de eco” y el “ensayo de impedancia mecánica” para aclarar que son técnicas distintas, no solamente por la distinta instrumentación, al estar el martillo instrumentado o no con un sensor de fuerza.

- *Ensayo de Eco.* En este la respuesta del sensor mide la vibración generada por el impacto del martillo analizándose en el tiempo (Figura nº 6).
- *Ensayo de Impedancia Mecánica.* En este el análisis se hace en el dominio de la frecuencia: se registra la fuerza y se obtiene una curva de movilidad (Figura nº 7).

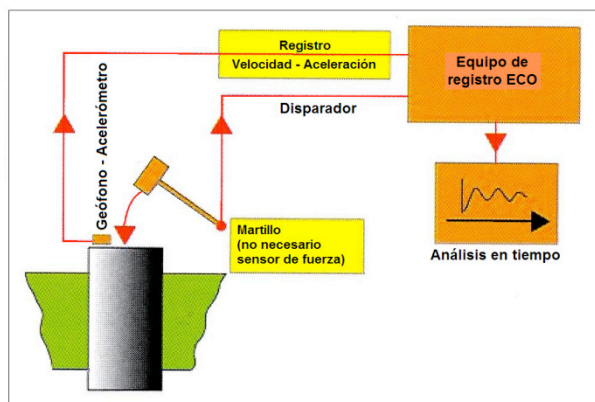


Figura nº 6. Ensayo de Eco Mecánica.

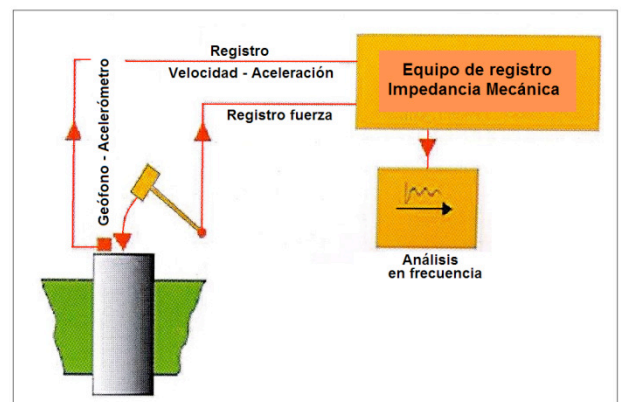


Figura nº 7. Ensayo de Impedancia Mecánica.

Los ensayos se realizan según la norma ASTM D 5882-00⁵.

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

Se aplica a cualquier tipo de pilote, incluso en micropilotes, no requiere ninguna preparación especial en el mismo, ni necesita equipo pesado, por lo que resulta económico y de gran rendimiento.

⁵ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. "Standard Test Method for Low Integrity Testing of Piles",

a) Aparato utilizado.

Es necesario un “martillo de mano” que al ser golpeado envía una onda corta de compresión a lo largo del fuste del pilote, la que es reflejada por las discontinuidades del pilote, por su punta, o por cambios de sección o variaciones del terreno que lo rodea. La señal del “acelerómetro” es amplificada y digitalizada por un sistema electrónico y convertida en velocidad, que presenta inmediatamente en la pantalla de un “microcomputador portátil”. (Figura nº 8). La gráfica que se obtiene puede ser archivada e impresa. La curva del gráfico de velocidad de un pilote continuo aparece en la pantalla como una línea relativamente recta con dos puntos máximos, donde el primero de ellos es el causado por el impacto del martillo, y el segundo por la reflexión en la punta del pilote (*Ensayo de Eco*). (Figura nº 9).

Dado que el porcentaje estadístico de fallos es reducido, se debe ensayar el 100% de los pilotes de la obra. En el caso de que se admita una reducción del muestreo, este debe ser del 30% como mínimo.

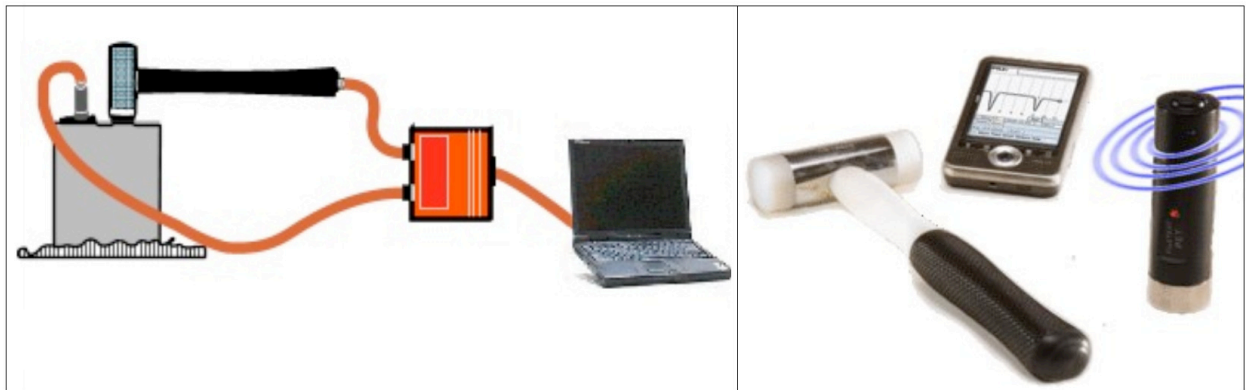


Figura nº 8. Disposición del ensayo sónico con martillo instrumentado.

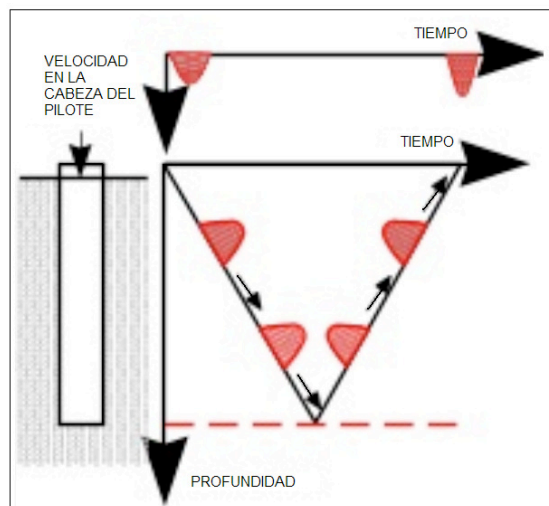


Figura nº 9. Ondas sónicas viajando a lo largo del pilote.

En las siguientes gráficas se muestra de manera simplificada, el fundamento del ensayo a partir del análisis de un tren de bolas, bajo dos supuestos, con

apoyo libre (por ejemplo, base en sustrato menos resistente que el hormigón o pilote actuando por fuste) y apoyo fijo o en sustrato duro, que provoca un acusado rebote de la onda sónica. (Figura nº 10).

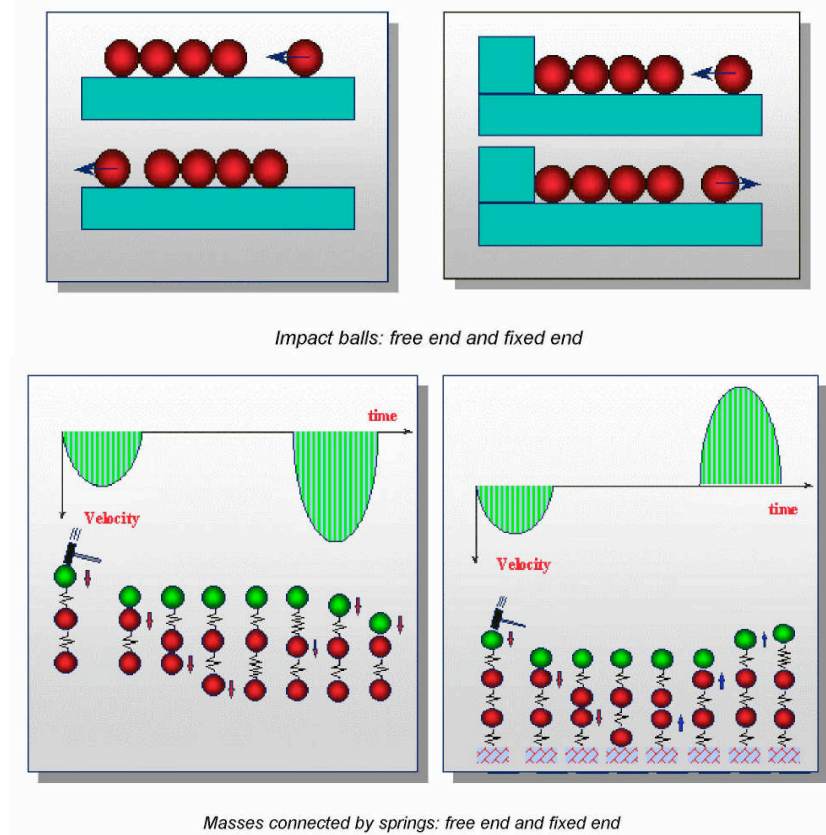


Figura nº 10.

Junto con las herramientas descritas más arriba (Martillo, acelerómetro y microcomputador portátil) se hace necesario un programa informático para la interpretación de las señales mecánicas que resultan del ensayo, este programa debe incorporar distintas técnicas para mejorar y explotar las señales obtenidas, para suavizar y promediar los golpes de martillo, la obtención de la curva media de varios golpes y la amplificación de la señal generada por las ondas, de manera lineal o exponencial, y así compensar los efectos de pérdida de señal generados por la profundidad.

Cuando se presenten dudas de la interpretación se dispone de otro martillo instrumentado con un acelerómetro en la cabeza, que permita obtener la fuerza del impacto en función del tiempo (*Ensayo de Impedancia Mecánica*). El programa informático permite obtener de los datos un gráfico del ensayo en el dominio de frecuencia, calculando la admitancia mecánica en una gama de frecuencias que comprenda al menos de 0 a 100 Hz.

- b) Operarios que realizan las pruebas o ensayos (Realización e interpretación de sus resultados).

Los ensayos en obra deben ser realizados por técnicos geotécnicos con experiencia en ensayos sónicos de integridad de pilotes y la interpretación de las gráficas y la redacción de los informes requieren un profesional geotécnico con mayor experiencia en ensayos de integridad de pilotes.

c) Preparación del pilote para el ensayo.

Los pilotes no requieren ninguna preparación especial, únicamente se necesita que se haya realizado el descabezado en el momento del ensayo y que estén accesibles al menos en parte en el momento del ensayo, y sin presencia de agua, suciedad u otros residuos. Esto se hace para que el golpe del martillo se realice sobre hormigón sano y la onda no refleje en discontinuidades o coqueas del hormigón poco compacto existente en la cabeza del pilote antes del descabezado.

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

La edad mínima del hormigón en el momento del ensayo es de una semana, pudiendo reducirse hasta cinco días en función del tipo de aditivos, para garantizar un grado de endurecimiento y un módulo de elasticidad que permitan que la onda se propague. En ocasiones se han conseguido obtener buenas señales a edades incluso más tempranas (menos de 5 días). Los ensayos no producen ninguna interferencia en la marcha de la obra, ya que se pueden ensayar grupos de pilotes a medida que se van construyendo y descabezando, y suele bastar un día o dos de preaviso para la realización de los ensayos.

El rendimiento de este tipo de ensayos es elevado, y en condiciones óptimas se pueden ensayar más de 100 pilotes al día. Para una adecuada realización del ensayo es recomendable disponer con la siguiente información:

A.- Un plano con la identificación de los pilotes.

B.- Longitud aproximada de cada uno de ellos

C.- Posibles incidencias durante la construcción de estos.

D.- Informe con las geotécnicas del suelo atravesado por el pilote, para facilitar la interpretación de los datos entregados por el o los ensayos.

El ensayo sónico también se puede utilizar en pilotes de cimentaciones antiguas, realizando previamente una cata por el lateral del encepado y dando el golpe del martillo y captando la onda en un lateral del pilote.

El número, tipo y localización de los pilotes a ensayar son establecidos por los mandantes.

d) Informe de resultados.

Para cada pilote ensayado se facilita una gráfica con al menos tres curvas en el dominio de tiempo (velocidad en función del tiempo) o la curva media de las mismas, correspondientes a diferentes golpes de martillo. Se pueden incluir también otros cálculos, o curvas en el dominio de frecuencias, si sirven para interpretar mejor algún ensayo. En la figura 11 se puede apreciar un gráfico con resultados de ensayos sobre pilotes.

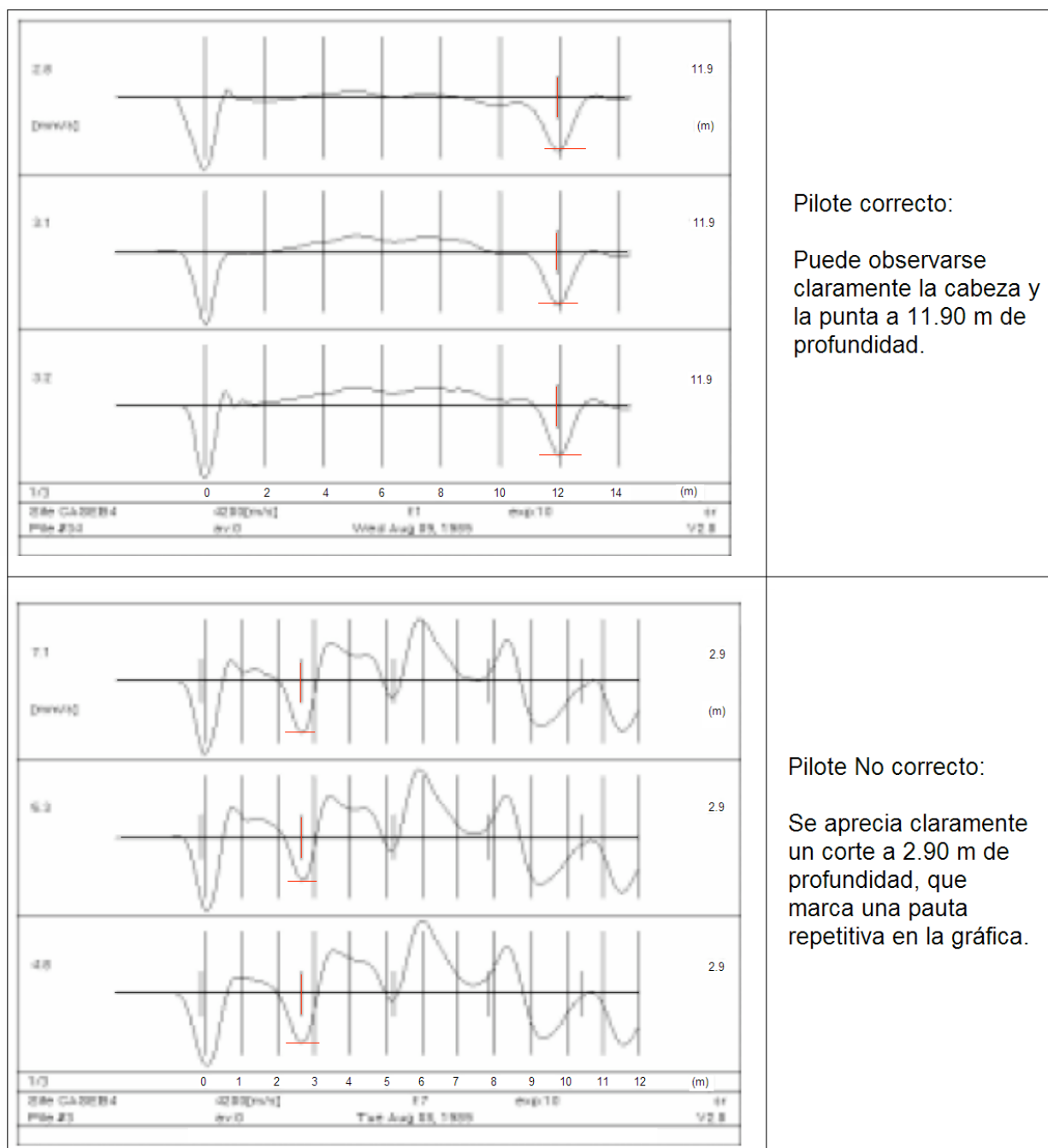


Figura nº 11. Gráficas resultado del ensayo sónico.

e) Criterios de aceptación y rechazo.

Los pilotes que presentan reflexiones insignificantes de la onda sónica en puntos del fuste del pilote por encima de la punta, y una clara reflexión de la onda en la punta serán considerados aceptables y aprobados. Cuando no se aprecia una reflexión clara de la onda sónica en la punta, cosa que puede suceder en pilotes muy esbeltos, se establece hasta que profundidad el ensayo puede considerarse significativo.

Es necesario dar una interpretación evaluando los posibles fallos en el pilote, si se aprecian reflexiones significativas o anomalías de la onda por encima de la punta del pilote. Para esto se puede auxiliar en las curvas del dominio de

frecuencia, de modelos matemáticos u otros métodos, así como de las informaciones facilitadas, u otros agentes que intervengan en el proceso constructivo. Si la evaluación realizada concluye que el fallo reduce significativamente la capacidad estructural del pilote, este es calificado como defectuoso. En el caso de gráficas de ensayo complicadas, que no permitan llegar a una conclusión clara, el pilote es calificado como cuestionable.

Por tanto se puede decir que es un:

Pilote correcto: aquellos en los que no se detectan anomalías relevantes, observándose la punta con claridad.

Pilote correcto con anomalías significativas: aquellos en los cuales se aprecian anomalías en la señal, como incremento de sinuosidad a partir de una profundidad, valles o crestas acusadas en algún punto, entre otros. Sin embargo, no impiden identificar la punta del pilote con claridad. Debe indicarse la profundidad de la anomalía y causa probable.

Pilote no correcto: aquellos que presentan anomalías graves que no permiten identificar la punta. En pilotes prefabricados, caso de perderse la señal en un empalme, la anomalía no debe considerarse como grave, sino como significativa.

f) Acciones correctoras

En el caso de detectar pilotes defectuosos o cuestionables, se pueden realizar nuevas pruebas complementarias que garanticen el estudio o directamente ser reparados o sustituidos por otros. Si se opta por las pruebas o ensayos complementarios, estos pueden ser de carga estática o dinámica, sondeos con recuperación de testigo continuo del hormigón, ensayos ultrasónicos "cross-hole" o excavación perimetral si los defectos no están a gran profundidad.

Las acciones correctoras pueden consistir en ejecutar un nuevo pilote, inyecciones de lechada a presión a través de perforaciones en el hormigón del pilote, arriostramiento a otros encepados con pilotes correctos, entre otros, todo esto tomando en consideración las cargas a las que están sometidos, las distancias entre pilotes y pilares, y el alcance de la anomalía.

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

2. COMPARACIÓN DE LOS DISTINTOS TIPOS DE ENSAYOS.

En la siguiente Tabla se muestran algunos de los parámetros característicos de los ensayos sónicos, dinámicos, semiestáticos y estáticos.

ENSAYOS	SÓNICOS	DINÁMICOS	SEMIESTÁTICOS	ESTÁTICOS
Masa martillo	0,5-5 kg	2000-10000 kg	2000-5000 kg	N/A
Deformación máx. en pilote	$2 \cdot 10^{-6}$	$500-1000 \cdot 10^{-6}$	$1000 \cdot 10^{-6}$	$1000 \cdot 10^{-6}$
Velocidad máxima en pilote	10-40 mm/s	2000-4000 mm/s	500 mm/s	10^{-3} mm/s
Fuerza máxima	2-20 kN	2000-10000 kN	2000-10000 kN	2000-10000 kN
Duración de la fuerza	0,5-2 ms	5-20 ms	50-200 ms	10^7 ms
Aceleración del pilote	50 g	500 g	0,5-1 g	10^{-14} g
Desplazamiento del pilote	0,01 mm	10-30 mm	50 mm	> 20 mm
Longitud onda relativa (*)	0,1	1	10	10^8

(*) Relación entre la longitud de onda de la fuerza aplicada y el doble de la longitud del pilote.

Como se puede apreciar en los ensayos sónicos sobre pilotes que al ser golpeados con un martillo manual que puede variar entre 0.5 y 5 kg genera una deformación pequeña si se compara con los otros que tienen una mayor masa, por lo mismo la velocidad máxima, la fuerza máxima, duración de la fuerza, desplazamiento y la longitud de la onda relativa del pilote son inferiores, generando un escaso o nulo daño a la estructura a diferencia de los otros ensayos.

En la Tabla siguiente se muestran las ventajas y desventajas de cada método.

Método	Ventajas	Desventajas
Ensayo Sónico con martillo de mano	No se requiere preparación especial del pilote.	Requiere interpretación especializada.
	Rapidez, sencillez y economía.	La punta del pilote no se detecta bien cuando la esbeltez es importante o hay varios cambios de sección.
	Detecta los fallos importantes en la calidad.	Se debe esperar a que el hormigón tenga una cierta resistencia.
Transparencia sónica	Se emplea en pilotes hormigonados "in situ" de cualquier diámetro o longitud. Los defectos se identifican claramente a cualquier profundidad.	Requiere que se dejen colocados tubos embebidos en el hormigón. En pilotes prefabricados esto no suele ser posible.
		Los tubos a veces se deterioran y quedan inservibles.
		Se debe esperar a que el hormigón tenga una cierta resistencia.
Ensayos rápidos de carga	Permiten una evaluación del pilote no solo estructural sino también geotécnica, obteniéndose su capacidad de carga.	Requiere una masa importante de impacto (ensayo dinámico) o un equipo especial (Statnamic).
Pruebas de carga estáticas	Son los ensayos de carga más similares al comportamiento de la cimentación en servicio.	Requiere un sistema de reacción que permita aplicar cargas elevadas superiores a las de servicio e incluso próximas a las de hundimiento.
Control automático de ejecución	Facilitan datos en tiempo real durante la ejecución del pilote, lo que permite optimizar el empleo de materiales y detectar fallos en edad temprana.	Solo están desarrollados para pilotes hincados y para pilotes barrenados.

Criterios para tomar decisiones o para elegir el tipo de ensayo de integridad más adecuado.

Transparencia sónica o ultrasónico Cross-Hole	Ensayo de eco o impedancia mecánica
<ul style="list-style-type: none"> • Este ensayo consiste en el tiempo que tarda una onda ultrasonica en propagarse desde un emisor a un receptor, la onda se desplaza por dos tubos llenos de agua dulce y limpia paralelos en el interior del pilote. • Se recomienda este ensayo para pilotes hormigonados in situ, de cualquier diámetro y longitud. • Se pueden ensayar 130 metro por hora. • Se requiere la colocación de dos tubos paralelos en el interior del pilote. • Es necesario que los tubos sean principalmente metálicos, pudiendo ser de plásticos para pilotes cortos. • Se requiere que los tubos estén adheridos a la armadura del pilote y además que estén cerrados herméticamente con tapones metálicos roscados, para evitar que entre tierra. • Si no se dejan estos tubos es imposible emplear este tipo de ensayo. • La utilización de poleas es fundamental para bajar las sondas por los tubos. • Las sondas deben tener un diámetro de 25 mm La frecuencia mínima de trabajo del emisor y del receptor será de 50.000 Hz. • La señal se traduce en un grafico que relaciona el tiempo que se tarda en llegar la onda al recepto en el eje X y el profundidad en el eje Y, para algunos casos se puede incluir la energía de la onda. • Este tipo de ensayo es para pilotes de gran diámetro (entre 80 y 150 cm). 	<ul style="list-style-type: none"> • Este ensayo consiste en aplicar una fuerza axial en la cabeza del pilote mediante un martillo de mano. • El ensayo de eco analiza la vibración en el dominio de tiempo. • El ensayo de impedancia mecánica registra la fuerza en el dominio de la frecuencia. • Se recomienda este ensayo para todo tipo de pilares e incluso para micro pilares. • Se pueden ensayar 100 pilotes al dia. • El ensayo no requiere preparación previa del pilote. • Es rápido, económico y de gran rendimiento. • Se puede realizar este ensayo a pilotes antiguos haciendo una cata por el lateral, golpeando con el martillo y captando la onda por el costado. • La deformación que se produce en el pilote es muy pequeña ya que varía entre 0,5 y 5 Kg, aplicada con un martillo de mano. • Es recomendable utilizar en profundidades menores a 30- 40 mt y preferentemente en terrenos no arcillosos – duros. • Esto ensayo solo se puede realizar cuando el hormigón tenga suficiente dureza, para que exista una buena propagación de la onda. • La señal del acelerograma es convertida en velocidad, representada por una línea con dos picos, la primera es la del golpe del martillo y la segunda es la respuesta. • Este tipo de ensayo es para pilotes con diámetros menores (< 80 cm), no entrega buenos resultados para grandes diámetros.

Solo para casos donde no hay defectos aparentes se recomienda utilizar la END, ya que consiste en un método para detectar anomalías.

En casos donde hay mayores zonas con daños es recomendable utilizar técnicas de carga, para poder determinar con mayor exactitud si el pilote es apto para el uso propuesto.

3. EJEMPLOS.

3.1. Ensayo de Transparencia sónica o ultrasónico Cross-hole.

Según el escrito *“El metodo de transparencia sonica”* realizado por Jean-Jacques Rincent, para la realización de este tipo de ensayo el procedimiento más común es la introducción de dos sondas en el fondo de dos tubos que se han llenado previamente con agua. Durante el izado un dispositivo colocado en el eje del torno controla la emisión de una señal cada vez que las sondas recorren un centímetro. Las impulsiones, visualizadas en pantalla, son digitalizadas y se almacenan en un ordenador.

El tratamiento de las señales se puede realizar por distintos métodos, uno de ellos consiste en representar el tiempo de propagación por un punto que corresponde al primer punto máximo (pico). La resultante de las medidas es una línea que cuando no hay anomalías es paralela al eje de origen de tiempos.

Dada la delicadeza del procedimiento, se ha detectado en algunas ocasiones una ligera falta de contacto entre el tubo y el hormigón debido a diversos factores, por ejemplo a una película de lubricante a la altura de los manguitos de unión entre tubos, esto hará desaparecer la señal sin aportar respuesta alguna sobre el origen de este fenómeno. Considerando este tipo de situaciones se plantea como solución el guardado de todas las señales obtenidas con el fin de despejar cualquier ambigüedad frente al problema señalado antes. Cada impulsión se procesa de manera que las amplitudes de la señal se transformen en distintos niveles de blanco, gris o negro. Una amplitud fuerte da una representación contrastada blanca y negra, una amplitud débil se convierte en gris. Se puede ver que los puntos máximos (picos) A, C y E de la Figura 12 se transforman en puntos negros y B, D y F en puntos blancos; de ahí la alternancia sobre una misma línea de puntos blancos y negros más contrastados cuando la amplitud es más fuerte.

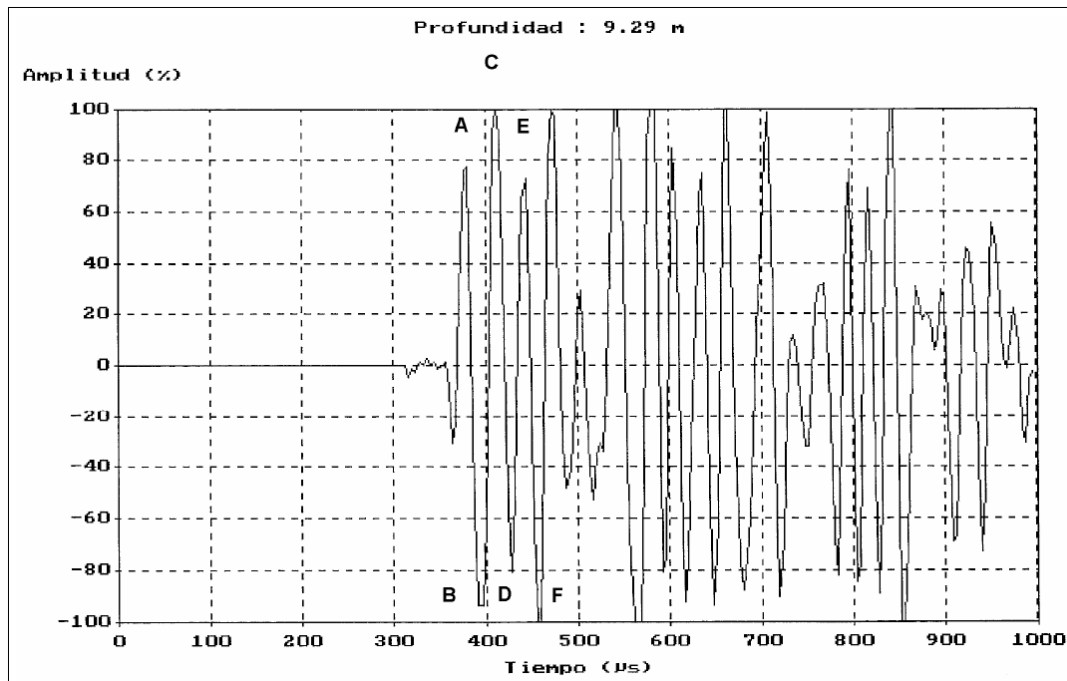
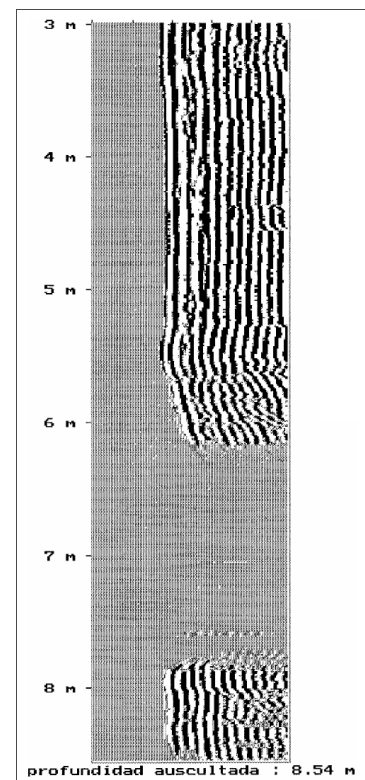


Figura nº 12. Ensayo de transparencia sónica. Visualización de la señal recibida.

La repetición de esta operación para cada impulsión permite la edición de una diagrafía (Las diagrafías o Log son curvas que se obtienen a lo largo de un sondeo y que son reflejo de las diferentes características de los materiales que atraviesa. Pueden estar relacionadas con la radiación gamma, con la resistencia al paso de una corriente eléctrica (resistivas), a la velocidad del sonido a través de la roca, etc.) como se puede ver en la Figura 13, que puede estar compactada con el fin de imprimirla en una página. Es posible calcular el tiempo medio de propagación en la diagrafía y por ejemplo, el tiempo en una zona anómala. Además, una representación en tres dimensiones (3D) permite afinar y mejorar la interpretación de los resultados.

En la visualización 3D de la Figura 14, se aprecia una anomalía que aparece a una profundidad del orden de los 8,30 metros. En esta representación sólo se ha conservado la parte superior de la señal para mejorar la legibilidad del diagrama.



**Figura nº 13. Ensayo de transparencia sónica.
Visualización Gráfica (diagrafía)**

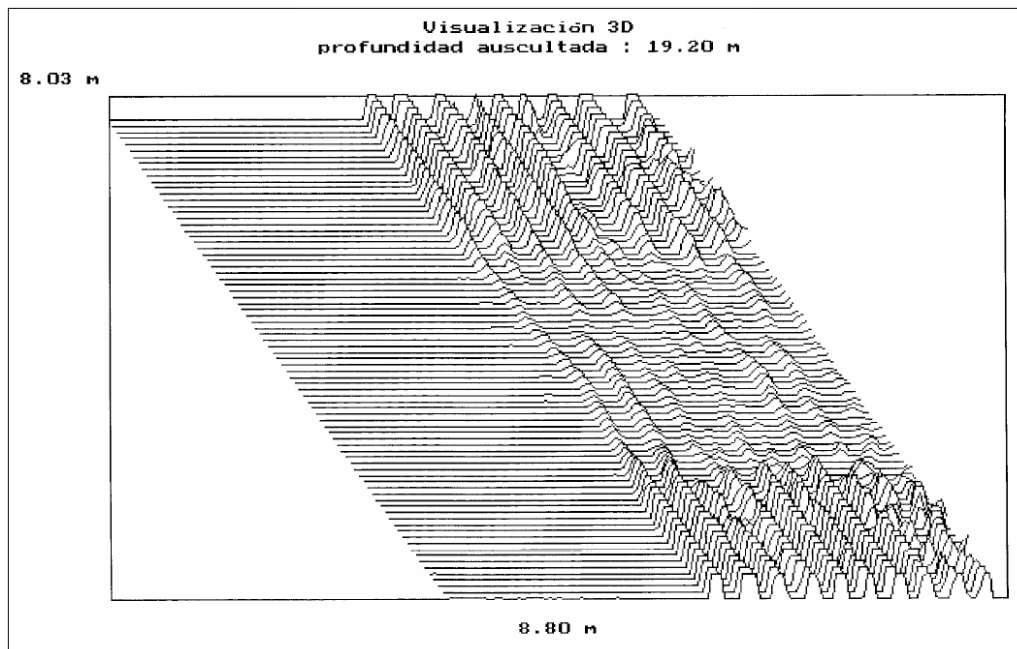


Figura 14. Ensayo de transparencia sónica. Visualización 3D

La amplitud del primer punto máximo (pico) disminuye progresivamente entre 8,25 y 8,30 m para volver hacia los 8,60 m de profundidad. Las señales guardadas en la memoria pueden ser restituidas y revelan la reducción de amplitud de las primeras señales a los 8,45 m (ver Figura 15) de profundidad y su posterior recuperación a los 8,62 m de profundidad (ver Figura 16). La visualización 3D muestra la atenuación del primer punto máximo (pico) y la vez confirma que se sigue manteniendo la alineación de los puntos máximos siguientes. Esta representación permite concluir que existe una reducción de amplitud de la señal sin aumento del tiempo de propagación. Se trata pues de hormigón sano. Se excluye por tanto un defecto de ejecución.

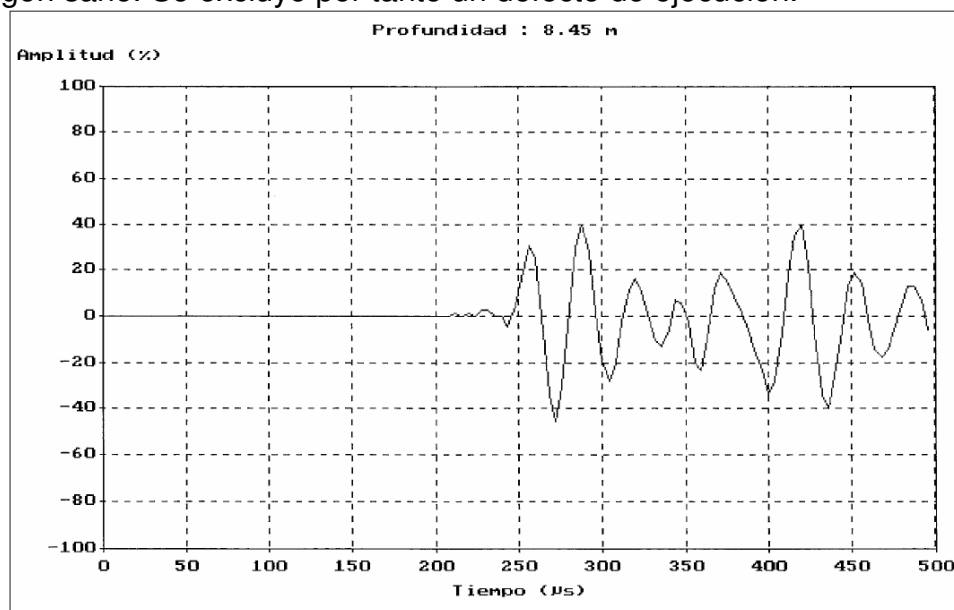


Figura 15. Ensayo de transparencia sónica. Visualización de la señal recibida.

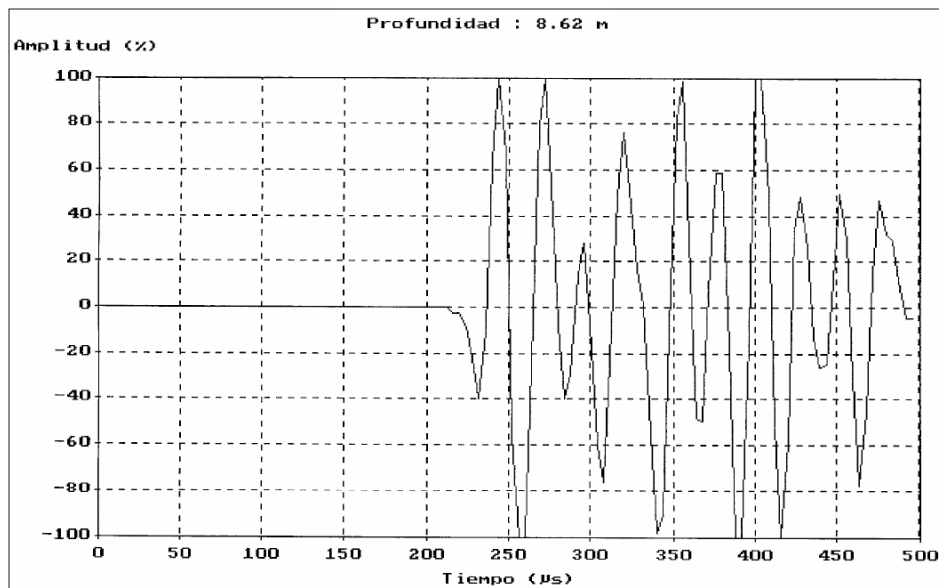


Figura 16. Ensayo de transparencia sónica. Visualización de la señal recibida.

Se entiende, por lo tanto que la interpretación realizada en base a esta manera de presentar los resultados permite apreciar los distintos niveles de gravedad de los defectos encontrados.

La Figura 17 se refiere al fuste de un módulo de pantalla en el que existe un defecto importante al apreciarse reducción de amplitud y aumento del tiempo de propagación, hechos que indican la presencia de un hormigón deslavado. Gracias a la concepción del material utilizado para los ensayos, es decir, la asociación de un microordenador con una estación analógico/digital de adquisición específica, el diagnóstico elaborado a partir de las diagráfías es más preciso. La experiencia asociada a estos medios permite eliminar dudas sobre anomalías menores y en presencia de defectos importantes, mejorar la elección de las recomendaciones para la reparación.

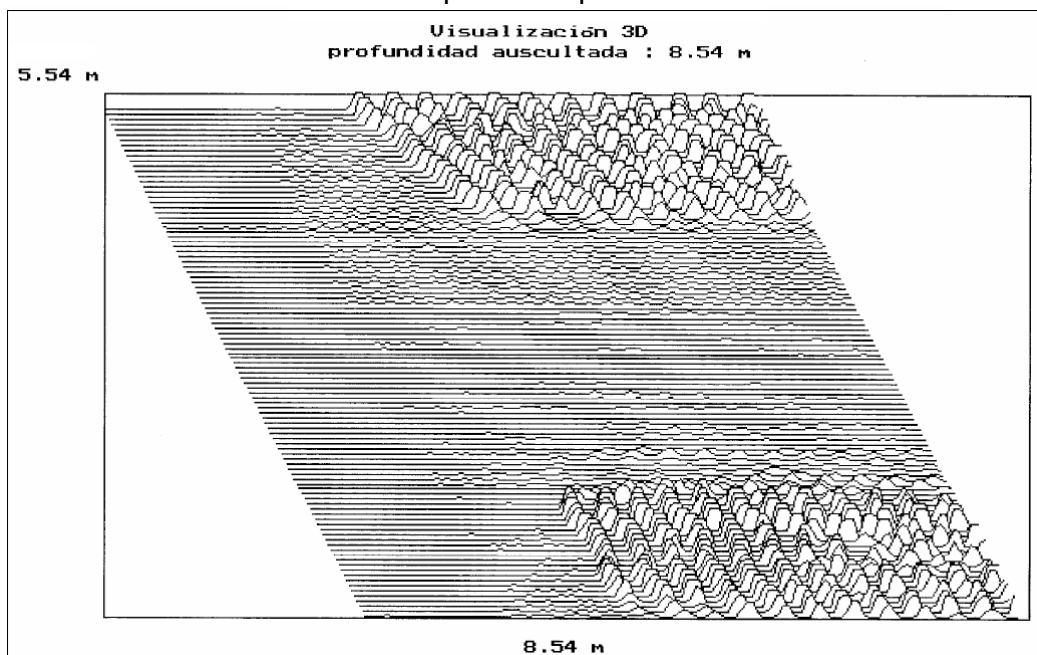


Figura nº 17. Ensayo de transparencia sónica. Visualización 3D

3.2. Ensayo Sónico o de Eco o de Impedancia.

Estos ensayos dinámicos de integridad basados en el método no destructivo de impedancia, como se mencionó anteriormente procesan la información que es aportada por una onda sónica producida por el impacto de un martillo en la cabeza de un pilote en una superficie plana y pulida preparada en el pilote descabezado, que después de propagarse a lo largo del mismo, alcanzan su punta y son reflejadas hacia su cabeza, donde el acelerómetro piezoeléctrico o geófono se ubica también en una superficie pulida, con la cual se registra el movimiento y calcula la fuerza producida por el impacto (ver Figura 18).



Figura nº 18. Fotografía de ensayo sónico.

El registro de aceleración creado por cada golpe de martillo es integrado en el sistema informático obteniendo su velocidad y muestra los datos en la pantalla del analizador de información. La señal recibida por el sensor se registra y procesa en un equipo electrónico/informático.

Si se asimila el pilote a un elemento prismático (varilla), se sabe que las ondas de presión originadas por el impacto del martillo son propagadas a lo largo del pilote con una velocidad de onda (c) obtenida de la siguiente ecuación:

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

Donde:

E : Módulo de elasticidad dinámico.

ρ : Densidad.

En la mayoría de los pilotes, el módulo elástico y la velocidad de propagación de la onda son casi constantes. En el caso del hormigón, la velocidad de propagación de onda varía entre 3500 y 4000 m/s. Así, las variaciones de la impedancia suelen indicar cambios en la sección transversal del pilote.

En el camino descendente por el pilote, la onda sufre una disipación de energía por amortiguamiento debido al propio material del elemento prismático. Si,

además, el elemento prismático está rodeado de material, como sucede en un pilote en todo su fuste al estar rodeado de suelo, la pérdida de energía de la onda es mucho mayor. El amortiguamiento de la señal depende entonces de la relación de rigideces entresuelo y pilote. Si el terreno que rodea al pilote es un suelo, relativamente más blando que el propio pilote, una gran cantidad de la energía se transmite a lo largo del pilote sin disiparse lateralmente, en caso contrario la disipación es mayor.

Las curvas de velocidad resultantes del proceso de los registros son comprobadas para localizar las reflexiones debidas a reducciones o incrementos de la impedancia, así como para determinar la situación de la punta del pilote y la existencia de daños a lo largo de este.

La onda transmite de este modo hacia la punta del pilote donde parte de la energía se transmite al terreno bajo la punta y parte se refleja. El análisis de la onda reflejada (Eco) permite obtener información sobre los cambios de las características mecánicas a lo largo del pilote (Figura 19).

Cualquier cambio brusco en las características mecánicas del pilote hace que la energía de la onda se divida en una parte que se transmite, siguiendo su camino, y otra parte que se refleja, tomando un sentido de propagación opuesto al que traía.

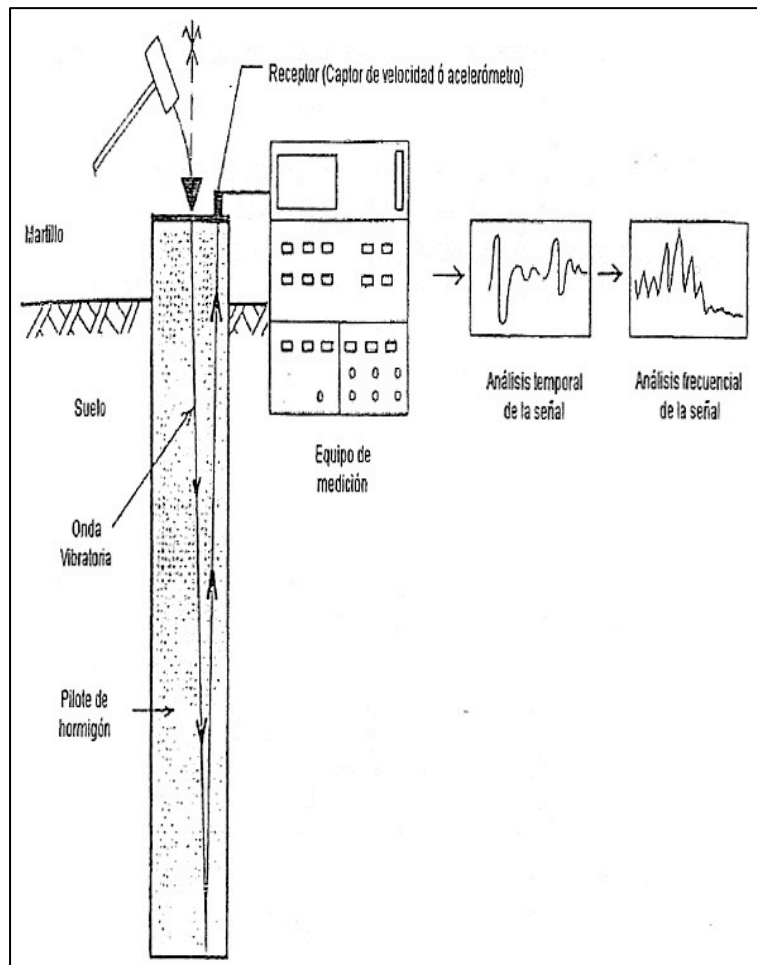


Figura nº 19. Realización del ensayo con onda reflejada.

A continuación se explica el procedimiento de cálculo básico para comprender los procesos de propagación de las ondas en el sistema explicado:

Las características mecánicas de un pilote son su densidad (ρ), el área de su sección transversal (A) y el módulo de elasticidad dinámico (E) o la velocidad de propagación (c). Estas características se pueden tratar conjuntamente bajo el nombre de impedancia (Z). Cualquier fenómeno de refracción y reflexión de ondas se puede poner en función de las impedancias.

La impedancia (Z) es definida como la relación entre el producto del módulo elástico E del material del pilote (hormigón, en este caso) y la sección transversal (A) del mismo, respecto a la velocidad de propagación de la onda (c) en el material (hormigón):

$$Z = \rho * c * A = \frac{E * A}{c}$$

Donde:

Z : Impedancia

E : Módulo elástico del hormigón

A : Sección transversal del hormigón

c : velocidad de propagación de onda en el hormigón

La densidad es un parámetro que suele variar relativamente poco. Son, pues, la velocidad de propagación (c), y sobretudo el área (A) de la sección transversal del pilote los que más afectan al valor de la impedancia.

Los cambios de la impedancia se producen, en zonas de cambio de calidad del hormigón (zonas con coqueras, zonas contaminadas, entre otros), en zonas de cambio de sección (estricciones y bulbos) y en la punta del pilote.

En un pilote sin defectos, el único cambio de impedancia se produce en la punta del pilote. En la punta, parte de la onda se refleja, volviendo a alcanzar la cabeza del pilote tras un tiempo (t), que puede ser medido. Conociendo la velocidad de propagación de la onda en el hormigón, que es de unos 3800 m/s, se puede calcular la longitud del pilote (L) como:

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

La profundidad de cualquier otra anomalía se puede detectar conociendo el tiempo (t) que tarda en recibirse el eco producido al alcanzar la onda esa anomalía:

$$h = \frac{c * t^2}{2}$$

Las reflexiones en la punta pueden presentar distinta o igual polaridad que la onda incidente. Si la punta del pilote está empotrada, la onda reflejada presenta distinta polaridad. Si la punta está libre, la onda reflejada tiene igual polaridad. En casos de cambio de sección, se registra en cabeza un eco de distinta polaridad si el reflejo se produce en un bulbo o ensanchamiento, y será de igual polaridad si se trata de un estrechamiento (Figura 20).

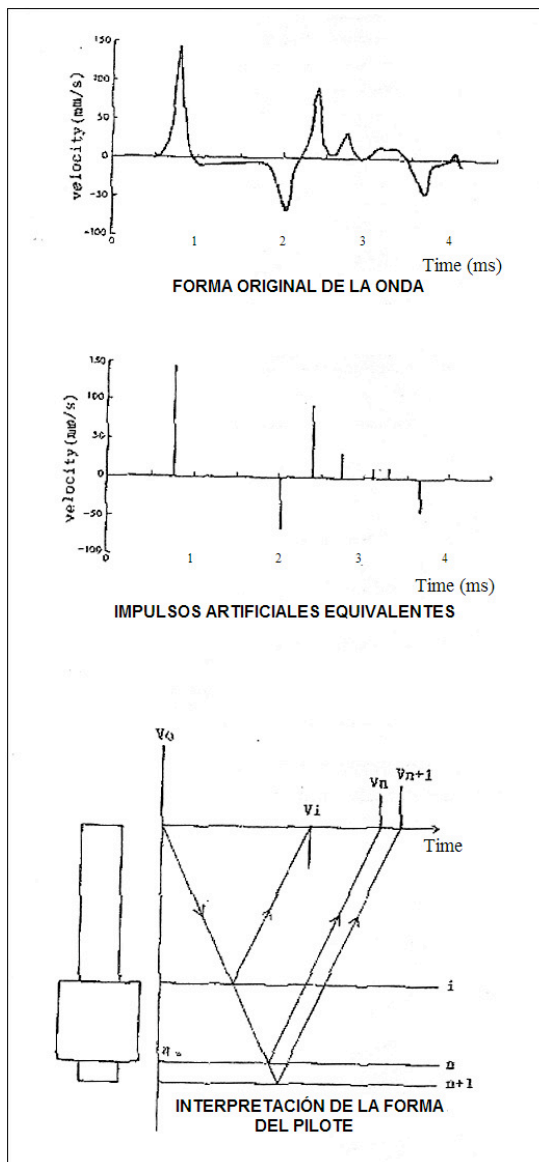


Figura nº 20. Tratamiento de una señal con magnificación y filtrado.

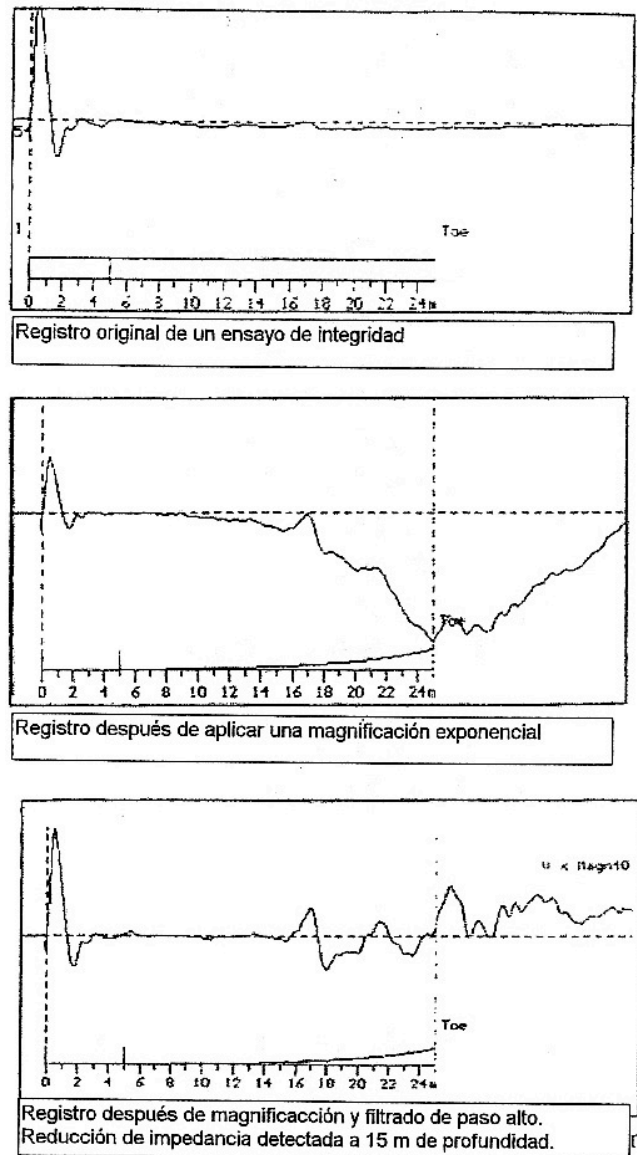


Figura nº 22. Cambios de polaridad de la onda, en los cambios de impedancia.

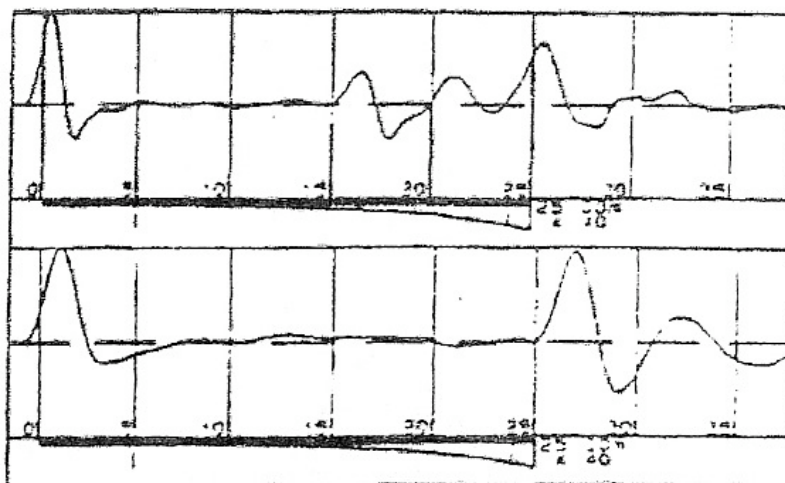


Figura nº 21. Análisis de la señal de un ensayo de eco en el dominio del tiempo.

Para evitar la pérdida de señal por amortiguamiento, la mayoría de los equipos disponen de un sistema de ganancia automática que amplifica exponencialmente la señal con el tiempo transcurrido. A pesar de eso puede confundirse el eco de la señal del ruido de fondo. La digitalización de la señal permite la aplicación de filtros de frecuencias de paso alto y bajo, que eliminen los “ruidos de fondo” que distorsionan la información que se busca. En las Figuras 20 y 21 se puede ver el tratamiento de una señal con filtros digitales, hasta descubrir un defecto en el pilote.

Otra manera de interpretar el ensayo de eco es realizar el análisis de la onda en el dominio de la frecuencia, en lugar del tiempo (Figura 23). Para esto se hace la hipótesis de que el pilote vibra como una varilla con unas frecuencias preferenciales (modos propios de vibración).

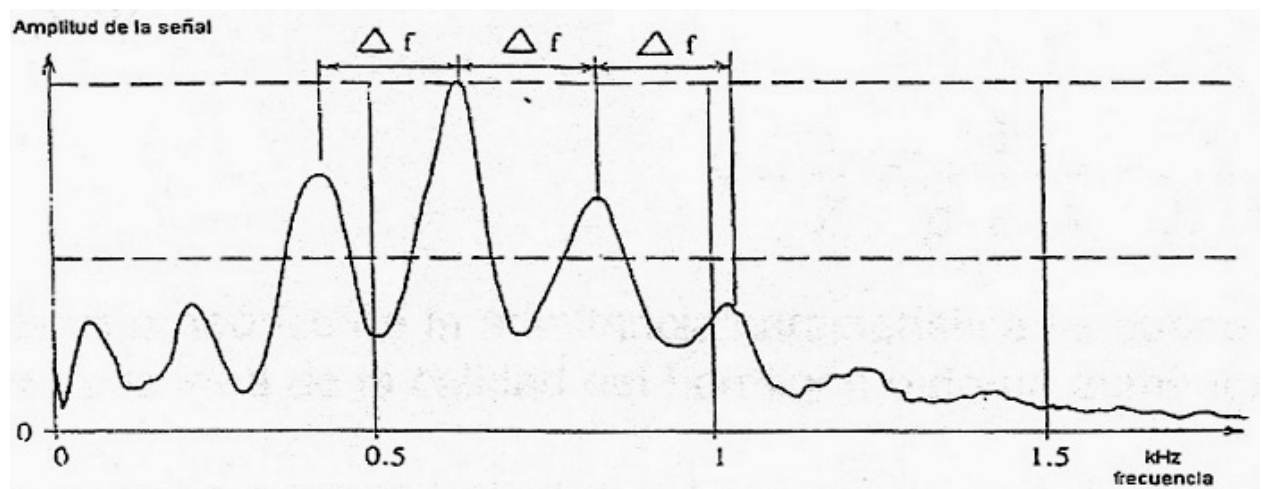


Figura nº 23. Análisis de la señal en el dominio de la frecuencia.

Entre dos frecuencias propias consecutivas hay siempre un desfase:

$$\Delta f = \frac{c}{2 * L}$$

Mientras Δf se puede calcular la longitud del pilote como:

$$L = \frac{c}{2 * \Delta f}$$

Si, además de instrumentar el pilote con un acelerómetro, instalamos otro acelerómetro en el martillo de golpeo, cuya masa es conocida, podemos disponer también del valor de la fuerza de impacto. La respuesta del pilote, analizada en el dominio de la frecuencia, constituye el “*Ensayo de Impedancia Mecánica*”.

Como la amplitud de la onda de velocidad depende de la magnitud del impacto, es conveniente normalizar la curva dividiendo por la fuerza aplicada en la cabeza del pilote. Esa curva, función de transferencia de velocidad producida

por una fuerza, que recibe el nombre de Movilidad (M). El análisis de la curva de movilidad permite además conocer otros parámetros del pilote (Figura 24).

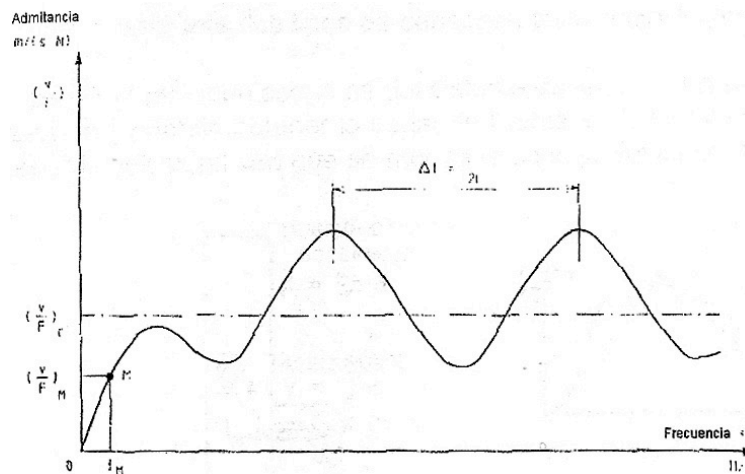


Figura nº 22. Gráfico de admitancias.

A pequeñas frecuencias, la curva de movilidad suele ser una recta. La pendiente de esa recta proporcional a la Flexibilidad ($1/k$ = inversa de la Rigidez Mecánica) del pilote.

$$M = \frac{V}{F} = 2 * \pi * f * \frac{1}{K}$$

$$K = 2 * \pi * \frac{f}{M}$$

En un pilote, la rigidez K depende principalmente de su diámetro, su longitud y de las propiedades del hormigón y del terreno que lo rodea. En un mismo terreno, pilotes del mismo diámetro y de longitudes similares suelen presentar rigideces muy parecidas. Si dentro de un grupo de pilotes, alguno de ellos presenta una rigidez muy inferior al resto, puede ser indicativo de algún tipo de rotura. En algunos casos donde las curvas de movilidad son difíciles de interpretar, el valor de la rigidez puede ser de mucha utilidad para identificar pilotes con rotura.

Además, a partir de la primera resonancia, el valor de la movilidad oscila en torno a un valor medio que se conoce como admitancia característica N y que es el inverso de la impedancia característica del pilote:

$$N = \frac{1}{Z} = \frac{1}{\rho * c * A} = \frac{c}{E * A}$$

Este valor teórico de la admitancia característica se puede comparar con el obtenido del gráfico para tener una idea de la calidad del hormigón o de un aumento o disminución de sección del pilote.

Las ventajas e inconvenientes del Ensayo de Impedancia son muy similares a las del Ensayo de Eco. No obstante, este ensayo dispone de más datos para realizar la interpretación, como son la rigidez dinámica y la admitancia característica. Siempre que se realice un Ensayo de Impedancia conviene analizar simultáneamente la curva de eco para obtener una interpretación común de los registros de eco y movilidad.

En el siguiente ejemplo, los pilotes son de hormigón H-250 y tienen longitud media de unos 31 metros.

Los resultados de dichos ensayos reflejan la continuidad estructural de todos los pilotes ensayados, confirmando la ausencia de daños en todos ellos.

RESULTADOS A.I.P.			
PILOTE	LONGITUD (m)	VELOC. ONDA (m/s)	RESULTADO
7	31.8	4000	PILOTE SIN ANOMALÍAS
1	31.0	4000	PILOTE SIN ANOMALÍAS
3	31.8	3900	PILOTE SIN ANOMALÍAS
2	31.9	3900	PILOTE SIN ANOMALÍAS
28	31.6	4000	PILOTE SIN ANOMALÍAS
16	31.5	4000	PILOTE SIN ANOMALÍAS
15	31.4	3600	PILOTE SIN ANOMALÍAS
14	30.9	4000	PILOTE SIN ANOMALÍAS
8	31.5	3500	PILOTE SIN ANOMALÍAS
13	30.5	3700	PILOTE SIN ANOMALÍAS
11	29.2	3000	PILOTE CON CONTINUIDAD ESTRUCTURAL Y BAJA VELOC. PROPAGACIÓN DE LA ONDA

Tan sólo en uno de los pilotes ensayados se llegó a detectar un hormigón de distinta calidad, al ser la velocidad de propagación algo inferior al intervalo considerado como normal, así como su rigidez respecto de los demás.

Las curvas obtenidas en la obra del ejemplo, y su posterior proceso en un programa de ajuste de parámetros, son la herramienta adecuada para confirmar la validez de los pilotes ensayados.

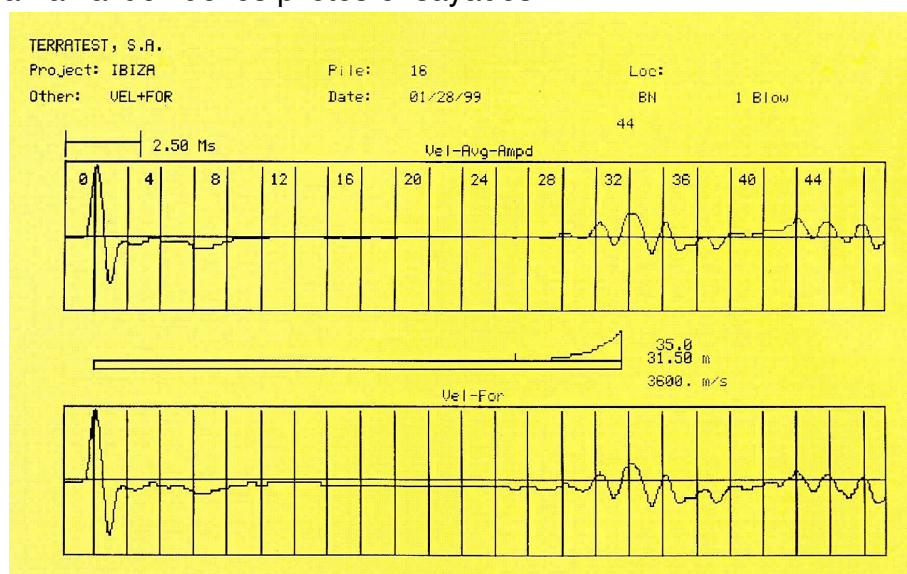


Figura nº 25. Gráfico Ensayo de Impedancia.

III. CONCLUSIONES.

Los ensayos de integridad mediante técnicas de evaluación no destructiva (END) se consideran como una herramienta de trabajo muy adecuada para poder determinar a modo experimental la existencia de defectos en pilotes y pantallas de hormigón in situ, disminuyendo el margen de incertidumbre existente en la construcción de estructuras. Estos entregan información sobre las dimensiones físicas, continuidad o consistencia de los materiales empleados en los pilotes, ayudando a determinar la calidad del hormigón endurecido, mencionados ensayos no proporcionan información directa sobre el comportamiento de los pilotes en condiciones de carga, por lo tanto no entrega su resistencia mecánica, debido a esto “en ningún caso reemplazan a los ensayos destructivos”.

De lo anterior, se puede visualizar que en el ensayo de END la onda realiza un recorrido alrededor del pilote, apreciándose incrementado el recorrido y con ello el tiempo de llegada para un hormigón de misma calidad. Por tanto se puede precisar que los ensayos mediante END son la etapa preliminar de los ensayos destructivos.

Entre las ventajas que presenta el ensayo sónico con martillo de mano es ser empleado en el control de pilotes, sin que sea necesaria una preparación especial del o los pilotes, de modo que no interfiere con la planificación y programación de la obra, gracias a su sencillez, rapidez y economía en su manera de efectuarse.

Si bien los ensayos sónicos (de Eco y de Impedancia) son pruebas dinámicas de “baja deformación”, permiten el análisis de la integridad estructural del pilote modificando de forma escasa o nula las propiedades del material.

También se puede ver que el ensayo de transparencia sónica o ultrasónico Cross-Hole se utiliza en el control de pilotes de gran diámetro, necesitándose solo dejar tubos metálicos embebidos en el hormigón del pilote, considerando que no es óptimo emplear tubos de pvc y/o de otro material poco resistente y de poca adherencia con el hormigón, porque pueden sufrir rotura al interior del pilote durante el hormigonado de este.

Otro punto importante de recalcar es que gracias al empleo de ensayos de integridad estructural de END se puede reducir los costos de construcción de cimentaciones, ya que disminuye el coeficiente de seguridad empleado en el cálculo de pilotes en la normativa geotécnica español (ROM 0.5-94), lo cual implica un abaratamiento de las cimentaciones en un grado muy superior al costo de los ensayos. A su vez genera una adecuada información, económica y rápida para estudiar si un pilote presenta aspectos defectuosos o anomalías.

Finalmente, se puede concluir que si bien la normativa sugiere una frecuencia de ensayos mínimos en pilotes, es normal que se deje a criterio de los profesionales a cargo, ya que depende de que se está buscando al controlar los pilotes, puesto que estos si poseen algún fallo o defecto no ocurre

frecuentemente en todos, sino que sucede de forma puntual, o sea puede estar defectuoso o con falla solo uno del total de pilotes, con lo que al efectuar un muestreo porcentual en relación al número total en la obra, no es adecuado ni mucho menos aconsejable, debido a que si hay un fallo y ese no fue detectado, de seguro la carga que debía solicitar no será repartida hacia los otros de forma de resistir solidariamente, sino que la estructura puede colapsar. Por ende, es aconsejable ensayar todos los pilotes mediante END sobretodo si se toma en cuenta que estos ensayos no tienen un gran costo y son de rápida ejecución.

IV. BIBLIOGRAFÍA

- García de la Oliva, J., & Sánchez, F. (2008). Recomendaciones para la ejecución e interpretación de ensayos no destructivos para el control de la integridad de pilotes y pantallas in situ. *Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS. 8ª Sesión, Pilotes de gran diámetro*. (págs. 35-50). Madrid: SEMSIG-AETESS.
- Balderas, J., & Marote, G. (2008). Pruebas de carga estáticas-bidireccionales en pilotes de gran diámetro. *Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS. 8ª Sesión, Pilotes de gran diámetro*. (págs. 69-91). Madrid: SEMSIG-AETESS.
- Castellanos, R. (2008). Pilotes en obras marítimas. *Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS. 8ª Sesión, Pilotes de gran diámetro*. (págs. 69-91). Madrid: SEMSIG-AETESS.
- MINISTERIO DE LA VIVIENDA. (2009) Código Técnico de la Edificación, Documento Básico SE-C Cimentaciones.
- Arcos, José. Luis. (2001). Pruebas dinámicas. *Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS. 1ª Sesión, Pilotes para edificación*. (págs. 69-91). Madrid: SEMSIG-AETESS.
- Tadeo, C. y Téllez, E. (2001). Sistemas de control. *Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS. 1ª Sesión, Pilotes para edificación*. (págs. 69-91). Madrid: SEMSIG-AETESS.
- Jimenez Salas, J. A. (1981). *Geotecnia y Cimientos I, II y III*. Madrid, España: Rueda.
- Muzás Labad, F. (2007). *Mecánica de suelos y Cimentaciones I y II* (1ª edición ed., Vol. 2). Madrid, España: Fundación Escuela de la Edificación.
- Rodríguez, J., Serra, J., & Oteo, C. (1989). *Curso aplicado de Cimentaciones* (4ª edición ed.). Madrid, España: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid (COAM).
- San Martín, T. (2007). Criterios de Control de calidad de cimentaciones pilotadas. *Revista de la Escuela Politécnica de Madrid*.
- Página web: www.ingecim.com
 - San Martín, T. Pliego de especificaciones técnicas particulares para la realización de control de pilotes.

- Página web: www.ilcc.es
 - Auscultación de pilotes y Muros pantalla. Método ultrasónico Cross-Hole.
- Pàgina web: www.ndinsitu.com
 - Rincént, J. El metodo de transparencia sonica. Norma NF P 94-1660-1.
- Página web: www.piletest.com
 - Tadeo, C. Especificación Técnica para ensayos de integridad de pilotes.
 - Tadeo, C. y Téllez, E. Los ensayos de integridad estructural de pilotes.

V. ANEXOS

ANEXO A

En los trabajos de construcción se emplean distintos tipos de pilotes, dependiendo del tipo de carga por soportarse, de las condiciones del subsuelo y de la localización del nivel freático.

Los pilotes se pueden dividir según su materialidad en las siguientes categorías:

- Acero
- Hormigón
- Madera
- Pilotes compuestos

A la vez, los pilotes de hormigón se pueden dividir según su fabricación en dos categorías:

- Pilotes prefabricados
- Pilotes in situ

1. Pilotes de hormigón in situ.

Los “*pilotes hormigonados in situ*” requieren la ejecución previa de una perforación, la cual debe estar estable durante todo el proceso de fabricación del pilote. En este proceso se incluye la colocación de armaduras y el hormigonado posterior. La perforación puede conseguirse, ya sea por “*desplazamiento del terreno*”, o bien “*con extracción del mismo*”.

Existen múltiples métodos para realizar pilotes, en función del sistema empleado para realizar el desplazamiento del terreno, o para mantener estables las paredes de la perforación, pero los principales métodos de ejecución de los pilotes, se pueden clasificar con arreglo al criterio anterior de la manera siguiente:

1.1. Pilotes de desplazamiento.

La construcción comienza con la hincada de una tubería recuperable de pared gruesa, que va cerrada en el fondo, o bien con un azuche perdido (CPI-2), o bien con un tapón de grava u hormigón seco (CPI-3).

El diámetro de estos pilotes suele oscilar entre 35 y 60 cm con cargas admisibles entre 550 y 1300 kN, según el diámetro.

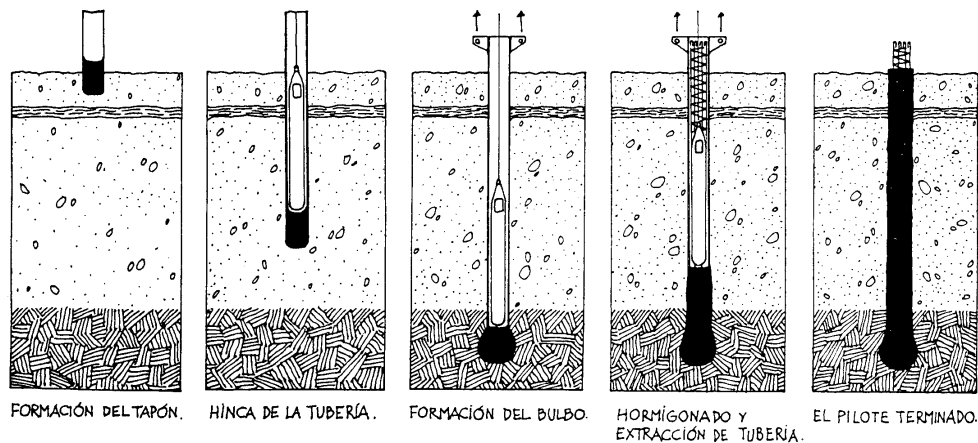


Figura nº 1. Ejecución de un Pilote Apisonado (CPI-3).

1.2. Pilotes de extracción.

En este se requiere algún sistema de contención del terreno, que sea capaz de mantener de manera estable las paredes de la perforación. Esta necesidad es más evidente cuando el terreno es incoherente y además, hay que perforar por debajo del nivel freático.

El método más clásico o convencional para sostener el terreno, consiste en la utilización de una “*entubación recuperable (CPI-4)*”, la cual es introducida poco a poco por golpeo o por vibración, excavando luego en su interior.

El proceso constructivo aparece en la figura nº 2. El diámetro de estos pilotes suele oscilar entre 45 y 100 cm, llegando a valores de 1.50 m y más, si se emplea una maquinaria especial que puede manejar tuberías de gran diámetro. La carga admisible de estos pilotes oscila entre 600 kN y 7.500 kN según el diámetro.

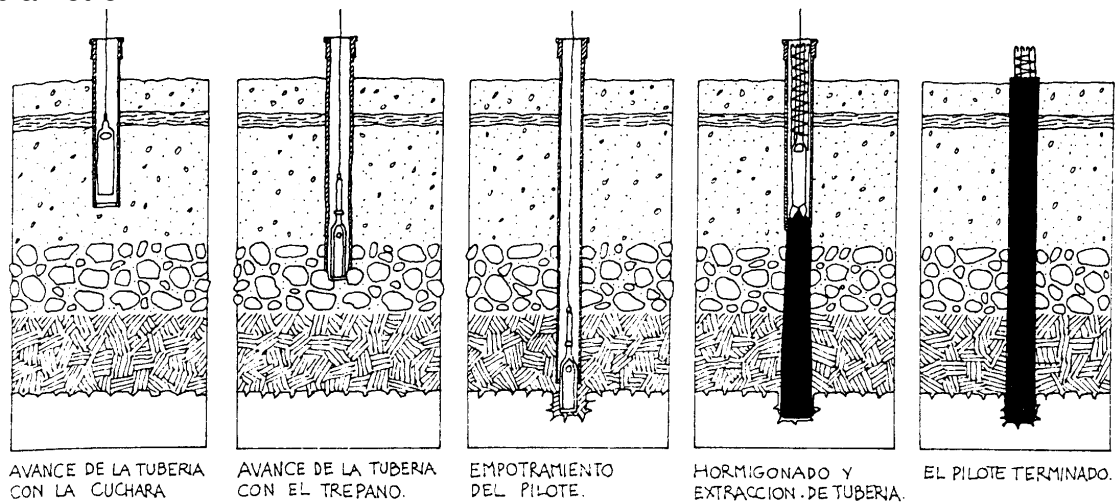


Figura nº 2. Ejecución de Pilote Perforado convencional (con cuchara y trépano).

Una variedad de este tipo de pilote, la constituye el “*pilote perforado con camisa perdida (CPI-5)*”, la cual puede ser la propia entubación (si no se retira) u otra tubería de pequeño espesor, la cual se instala con las armaduras. La finalidad de la camisa es proteger el pilote, en toda su longitud o en parte de ella, de ciertos medios agresivos, o de evitar el desplazamiento del hormigón cuando hay zonas de terreno excesivamente blando.

Otra técnica que se emplea en pilotes de gran diámetro, debido a la dificultad que tiene manejar tuberías muy pesadas, es la de estabilizar las paredes mediante el **“empleo de lodos tixotrópicos (CPI-6)”**, con los cuales se va rellenando la perforación a medida que progresa la excavación.

Cuando el terreno es cohesivo e impermeable y no hay presencia de agua, los pilotes se pueden hacer **“perforados con una hélice corta y sin necesidad de contención de las paredes (CPI-7)”**. El proceso constructivo aparece en la figura nº 3, en los cuales el diámetro suele oscilar entre 35 y 65 cm con cargas admisibles comprendidas entre 400 y 1.250 kN.

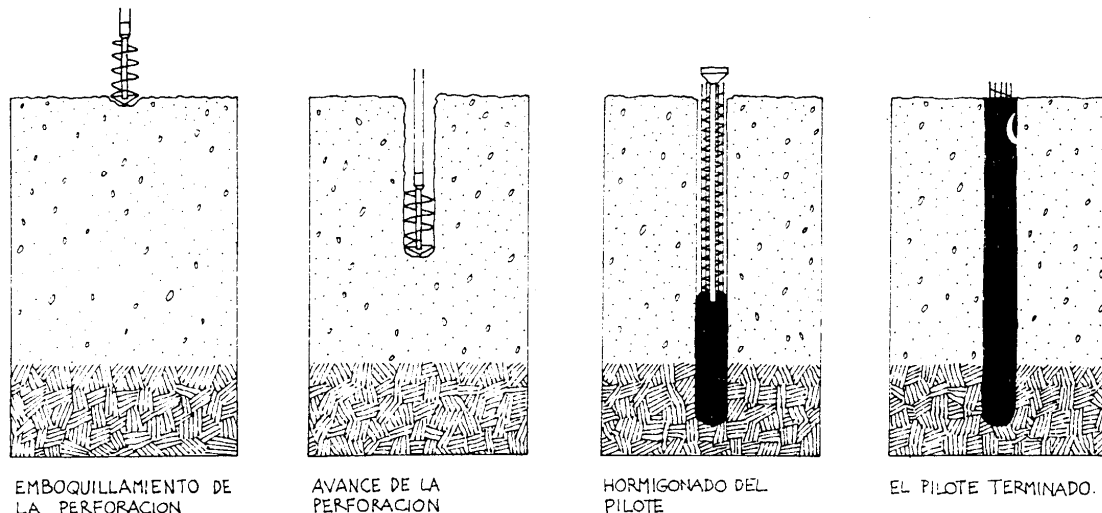


Figura nº 3. Ejecución de Pilote Perforado con Hélice sin entubación.

Finalmente, puede efectuarse la **“perforación sin entubación”**, utilizando una **“barrena hueca de longitud superior a la profundidad del pilote (CPI-8)”**. El proceso constructivo aparece en la figura nº 4, en esta se produce que la barrena hueca sostiene las paredes durante la perforación y por lo cual, una vez alcanzada la profundidad especificada, se realiza el hormigonado del pilote a través del tubo de la barrena. Durante el hormigonado, se va extrayendo la barrena simultáneamente, la cual va sacando el terreno perforado. Los diámetros habituales de este tipo de pilote oscilan entre 35 y 75 cm, estando la carga admisible comprendida entre 400 y 1750 kN.

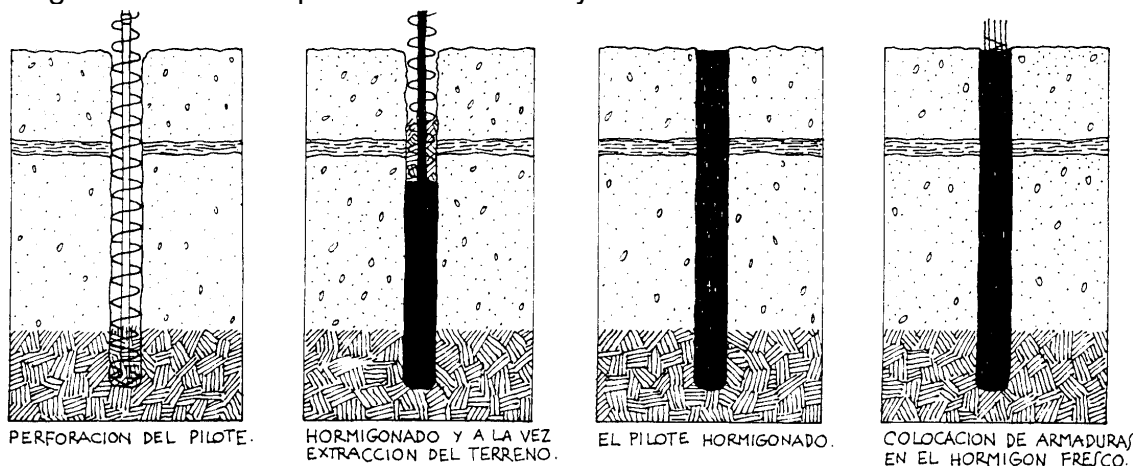


Figura nº 4. Ejecución de Pilote Perforado con Barrena Continua (sin entubación).

2. Pantalla de pilotes

Está compuesta por pilotes de hormigón “in situ”, los cuales se construyen sobre la línea del futuro muro. Estos se usan como sostenimiento de terrenos cuando es necesario proteger excavaciones, siendo de utilidad en ciertos casos, y puede adoptar diversas disposiciones, como se indica en la figura nº 5, dependiendo de las características del terreno, fundamentalmente de la cohesión del mismo y de la presencia de agua.

Las disposiciones utilizadas son las siguientes:

1. Pantalla discontinua de pilotes o separados entre su caras.
2. Pantalla de pilotes tangentes.
3. Pantalla de pilotes secantes o superpuestos.

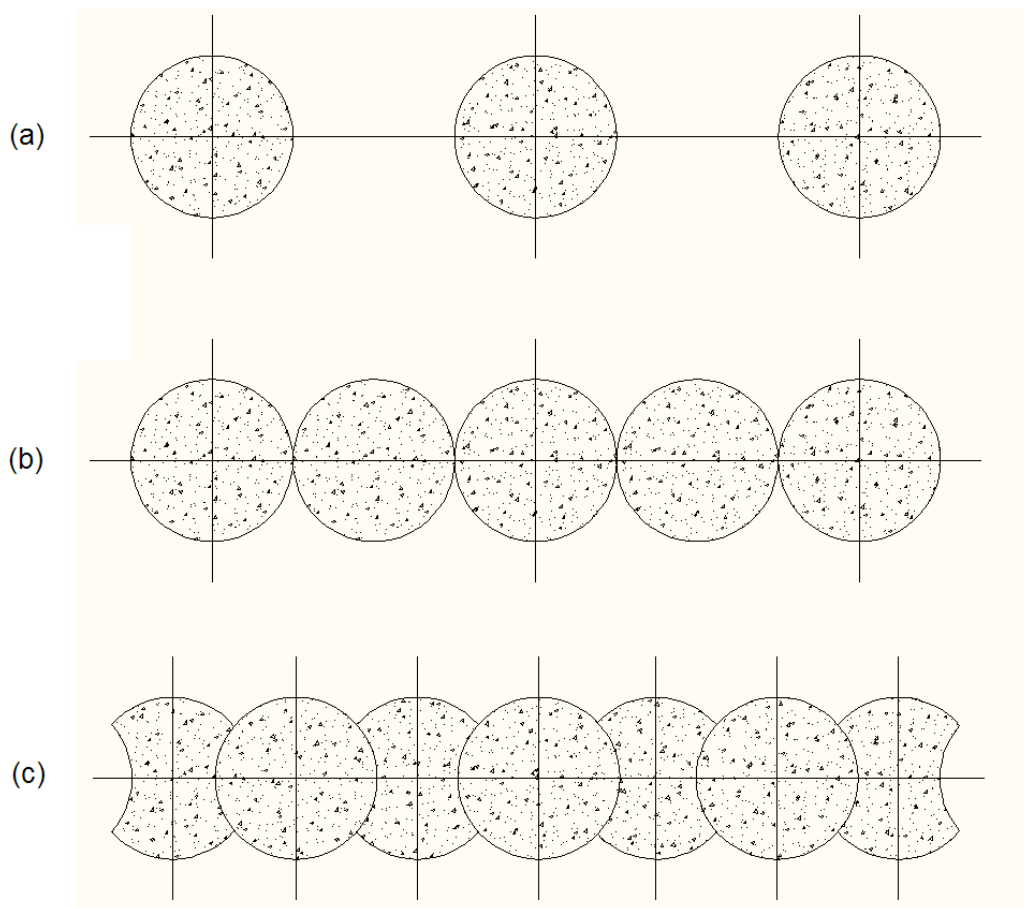


Figura nº 5. Tipos de Pantallas de pilotes. (a) Discontinuos (b) Tangentes (c) Secantes.

ANEXO B

1. Transparencia sónica o método ultrasónico “Cross-hole”.



Foto nº 1. Ejecución de ensayo de Transparencia sónica o ultrasónico Cross-hole en campo.



Foto nº 2. Equipo de ensayo de Transparencia sónica o ultrasónico Cross-hole.



Foto nº 3. Tubos de acero roscados e insertos en pilote para ensayo de Transparencia sónica.

2. Ensayo Sónico o de Eco o de Impedancia mecánica.



Foto nº 4. Ejecución ensayo sónico en campo.