

Evaluación de Integridad Estructural de Pilotes a partir de ensayos Crosshole (CSL) y Método Sónico (PIT)

Gonzalez Paiz, Daniel Javier A. (1); Fernandez Vincent, Juan Manuel (2); Diaz Casado, Sergio (1); Navarro, Hector (1)

(1) Ingeniero de Proyectos, Pilotes Terratest S.A.

(2) Gerente Técnico Regional, Pilotes Terratest S.A.

dgonzalez@terratest.cl, jmfernandez@terratest.cl, Alonso de Cordova 5151 Of. 1401 Las Condes

Resumen

La integridad estructural de pilotes hormigonados in-situ, es un tema de importancia tanto para la calidad y seguridad del proyecto. Los ensayos de integridad estructural de pilotes como el Crosshole Sonic Logging (CSL) test o Ensayo Crosshole, y el Pile Integrity Testing (PIT) o método sónico, entregan información sobre la continuidad del pilote, la calidad del hormigón, extensión y localización de defectos. El contar con una herramienta capaz de verificar que no existen fallas significativas en los pilotes, las cuales pudieran comprometer su capacidad estructural, convierte a estos ensayos en un apoyo tanto para especialistas geotécnicos como estructurales.

En este artículo se presentan las principales características, ventajas y limitaciones de los ensayos Crosshole y Sónico, además de presentar los resultados de pilotes reales medidos con ambos ensayos.

Palabras-Clave: Ensayos de Integridad, CSL, PIT, pilote

Abstract

Pile integrity of cast-in-place piles is an important issue for construction quality and safety of a project. Pile integrity tests, such as the Crosshole Sonic Logging (CSL) and Pile Integrity Testing (PIT) provide information of the pile continuity, concrete quality, extent and location of defects. The ability of these test to verify that no significant flaws are observed in foundation piles, flaws that could compromise pile structural behavior, should be seen as an effective tool for both geotechnical and structural engineers.

This article describes the main features, advantages and limitations of both crosshole sonic logging and sonic method tests, as well as presenting the results of a real piles.

Keywords: Pile Integrity Tests, CSL, PIT, piles

1 Introducción

Los controles de calidad para asegurar la correcta ejecución de los pilotes hormigonados in situ se llevan a cabo desde el proceso de perforación y durante el proceso de hormigonado de los mismos, pero por lo general es muy difícil o casi imposible poder confirmar la integridad del pilote luego de haber sido hormigonado, sobre todo existieran condiciones especiales que pudieran dificultar la ejecución de los mismos.

Los ensayos de integridad entregan información básicamente sobre la continuidad y la homogeneidad del hormigón a lo largo de pilote. Son una potente herramienta para poder

determinar, de manera experimental, la existencia de defectos en los pilotes de forma rápida y económica. Es importante mencionar que este tipo de ensayos no entregan información sobre el comportamiento de los pilotes bajo condiciones de carga, es decir estos ensayos no buscan reemplazar a los ensayos estáticos o dinámicos de carga, sino que deben verse como una fuente adicional de información sobre la condición de los pilotes construidos.

Dos de los ensayos más utilizados a nivel mundial para la evaluación de integridad de pilotes, son el ensayo crosshole (CSL, por sus siglas en inglés) y el ensayo de baja deformación (low-strain impact integrity test) también llamado método sónico o de eco, al cual nos referiremos como PIT (Pile Integrity Testing). En la práctica el número de pilotes ensayados en un proyecto corresponde aproximadamente 20% del total de pilotes del proyecto, sin embargo debido a su bajo costo, rapidez de ejecución y la relevancia de la información que se obtiene se debería de ensayar el 100% de los pilotes de un proyecto.

En las siguientes secciones se presenta una breve descripción de los ensayos antes mencionados, así como sus principales ventajas y desventajas, para luego presentar resultados obtenidos de mediciones sobre pilotes con ambos métodos.

2 Ensayo Crosshole (CSL)

El ensayo crosshole (CSL) consiste básicamente medir el tiempo de que tarda una onda ultrasónica esférica en propagarse desde un emisor a un receptor a través del pilote. Las sondas se mueven simultáneamente a lo largo del pilote a través de dos tubos de auscultación, los cuales están sujetos a la armadura del pilote y quedan hormigonados permanentemente dentro del pilote. El tiempo medido es función de la distancia entre el emisor y el receptor, así como de las características del medio atravesado.

El equipo de medición consta básicamente de una sonda emisora y una receptora, un computador de terreno y un set de poleas equipadas con un sensor de profundidad, con los que se registra la posición de las sondas mientras se desplazan simultáneamente a través del pilote. A medida que las sondas van ascendiendo por los tubos de auscultación, los cuales deben estar llenos con agua al momento del ensayo, se emite un pulso ultrasónico (p. ej. > 20.000 Hz) normalmente cada 5 cm y se registra continuamente el tiempo de llegada de la onda (FAT, por sus siglas en inglés) y la energía relativa entre sondas. A la medición y registro de datos entre dos tubos se le conoce como perfil. El número de perfiles medidos es función del número de combinaciones entre tubos de auscultación (ver Fig. 1).

El número de tubos de auscultación dependerá del diámetro del pilote, a modo general se instala un tubo de auscultación por cada 0.30m de diámetro de pilote y se distribuyen equitativamente en el perímetro de la armadura. El ensayo se lleva a cabo de acuerdo a la norma ASTM D6760 [1].

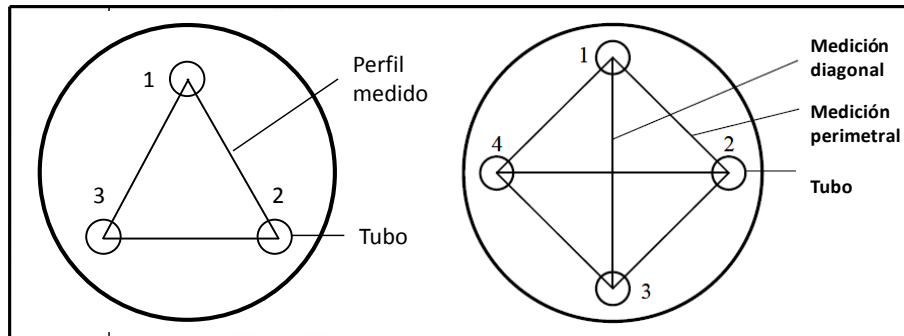


Fig. 1 – Configuraciones típica de tubos de auscultación

2.1 Interpretación de resultados de ensayo CSL

El análisis de los perfiles registrados permite la detección de anomalías presentes en el pilote, las cuales se manifiestan mediante un incremento en el tiempo de llegada de la onda (FAT) y/o una reducción de la energía relativa (intensidad de señal). La velocidad de onda del hormigón puede ser estimada dividiendo la distancia entre los tubos de auscultación del perfil evaluado entre el tiempo de llegada de la onda (FAT), esta velocidad de onda deber entenderse como una velocidad de onda aparente, debido a que los tubos de auscultación pueden desviarse de su posición original al momento de instalar los cuerpos de armadura o durante el proceso de hormigonado del pilote, lo que genera que los tubos no sean completamente paralelos a lo largo de todo el pilote.

La velocidad de onda aparente puede usarse un apoyo al momento de evaluar la calidad del hormigón debido a que la velocidad de onda está directamente relacionada con la resistencia a la compresión del hormigón, el rango de la velocidad de onda en hormigón sano se encuentra entre los 3000 a 4500 m/s. Sin embargo la evaluación de integridad debe basarse en el tiempo de llegada de la onda (FAT) entre sensores, ya que junto con la intensidad de la señal (convertida en energía relativa), son los principales parámetros que se miden en el ensayo (ver Fig. 2).

Por lo general un incremento significativo en el tiempo de llegada de la onda (FAT) acompañado de una significativa reducción de la energía relativa indican la presencia de una anomalía, mientras que si solo se observa una reducción de energía sin incremento en el tiempo de llegada (FAT) indicaría la presencia de hormigón de menor calidad, mas no necesariamente un defecto en el pilote.

La norma ASTM D6760 [1] define distintos niveles de anomalías, pero no define los criterios específicos con los cuales asignar estas anomalías en los perfiles medidos. Según publicaciones del CEDEX [2], Amir [3][4] y Fernandez [5] se puede considerar lo siguiente:

- Incremento en el tiempo de llegada de la onda (FAT) menor a 10% respecto a la media del perfil, con nula distorsión de la señal, se considera como un ensayo sin anomalías.
- Incremento entre el 10% - 20%, respecto a la media, en el tiempo de llegada (FAT), con escasa distorsión de la señal y leve disminución de la energía relativa, se considera como anomalía menor.
- Incrementos por sobre el 20%, respecto a la media, en el tiempo de llegada (FAT), producen una distorsión significativa tanto en la señal como en la energía relativa, esto es considerado

como una anomalía mayor. Dependiendo de su ubicación y extensión pueden convertir a las anomalías mayores en defectos, los cuales pueden afectar la capacidad estructural del pilote.

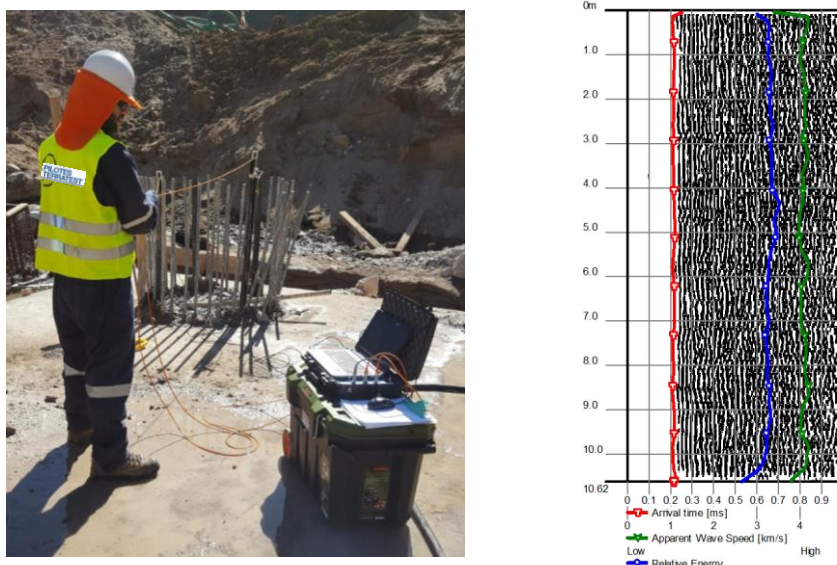


Fig. 2 – Ejecución ensayo Crosshole (CSL) (izq.) y ejemplo de perfil CSL (der.)

2.2 Ventajas y desventajas de ensayo CSL

En la siguiente tabla se presentan las principales ventajas y desventajas, luego de haber presentado las principales características del ensayo crosshole (CSL) y de haber abordado de manera general la interpretación de los resultados obtenidos.

Tabla 1 – Cuadro comparativo ventajas y desventajas, ensayo Crosshole (CSL).

Ventaja	Desventaja
No hay límite en cuanto a longitud de pilote a ensayar.	Los tubos de auscultación deben colocarse previo al hormigonado (preselección de pilote a ensayar)
La interpretación de un defecto importante es relativamente sencilla.	Varios factores pueden influenciar en mala interpretación de los resultados (hormigón en proceso de curado, pérdida de contacto entre tubo de auscultación y hormigón, pérdida de agua en los tubos, etc.)
Se puede determinar la profundidad a la que se localiza una anomalía con bastante precisión.	Solo se puede evaluar el hormigón entre los tubos de auscultación.
Se puede estimar la extensión horizontal de un defecto si se tienen suficientes tubos de auscultación.	Cuando los resultados son complicados o no concluyentes, la evaluación requiere de mucha experiencia y criterio profesional.
Ensayo con mayor detalle y calidad de información.	Mayor costo que ensayo de integridad PIT.

3 Ensayo Método Sónico (PIT)

El ensayo PIT, el cual se basa en la teoría de propagación de ondas, consiste en golpear la cabeza del pilote con un martillo ligero que genera una onda de compresión que viaja a lo largo del pilote (ver Fig. 3). La onda se refleja cuando se encuentra con un cambio de impedancia o la punta del pilote, incluso por excesiva rugosidad entre el pilote y el suelo. La señal creada por el golpe del martillo es medida por un acelerómetro que se coloca en la cabeza del pilote. La señal resultante, llamada reflectograma, es capturada por el acelerómetro y transmitida a un computador para su evaluación.

La impedancia (Z) está relacionada con la sección transversal (A), módulo de elasticidad (E) y velocidad de onda del pilote (c). Es decir, la reflexión de una onda de compresión está relacionada con un incremento de impedancia y por el contrario la reflexión de una onda de tracción está relacionada con una reducción de impedancia. Este ensayo es llevado a cabo de acuerdo a la norma ASTM D5882 [6]. Los valores de velocidad de onda en hormigón sano se encuentra entre los 3000 a 4500 m/s.

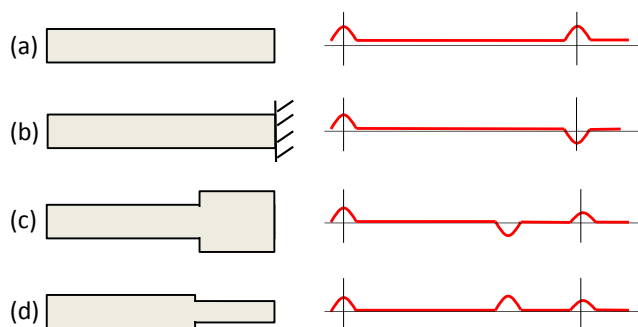


Fig. 3 – Ejecución ensayo PIT (arriba), ejemplos de reflectogramas típicos: (a) Pilote continuo, se refleja la punta, (b) pilote continuo punta empotrada o apoyada en estrato muy duro, (c) aumento de impedancia (ensanchamiento), (d) reducción de impedancia (estrechamiento).

3.1 Interpretación de resultados de ensayo PIT

En general el ensayo PIT no obtiene resultados claros para pilotes con una relación L/D entre el largo (L) y el diámetro (D) entre 30 y 40, siendo L la longitud y D el diámetro del pilote, por lo que

en algunos pilotes muy esbeltos puede que solo se obtenga información de la parte superior del pilote.

Dependiendo de ciertas características de los reflectogramas obtenidos del ensayo PIT, Liang y Rausche [7] proponen la siguiente clasificación para evaluar los pilotes:

- Clase AA, registros en los cuales se puede determinar claramente la reflexión de la punta del pilote y que además presenta variaciones menores de velocidad entre la cabeza del pilote y la reflexión de la punta.
- Clase AB, registros con variaciones menores de velocidad a lo largo del pilote, pero en los que no es posible determinar con exactitud la reflexión de punta.
- Clase AB(x), son registros AB que presentan variaciones menores de velocidad hasta una profundidad "x", profundidad a partir de la cual no es posible interpretar el resto del registro. Esto se debe a limitaciones propias del ensayo, se observa en pilotes muy esbeltos o cuyo fuste se encuentra rodeado de un estrato muy resistente y/o en pilotes cuyo fuste presenta muchas protuberancias.
- Clase PF(x), registros en los que se puede determinar la reflexión de punta, pero que presentan una anomalía menor a una profundidad "x".
- Clase PD(x), registros en los que se puede determinar la reflexión de punta, pero que presentan una anomalía mayor a una profundidad "x", esto se puede deber a una reducción de sección o una variación importante de la calidad del hormigón.
- Clase IR, registro no concluyente, es decir reflectogramas con mucha vibración los cuales no permiten evaluar el pilote.

De acuerdo a la norma [6], se deben registrar los reflectogramas de varios impactos de martillo, con los cuales se obtiene un registro promedio de la medición. El registro promedio es el registro que se evalúa. Se recomienda golpear la cabeza del pilote en tres posiciones distintas.

3.2 Ventajas y desventajas de ensayo PIT

En la siguiente tabla se presentan las principales ventajas y desventajas, luego de haber presentado las principales características del ensayo PIT y de haber abordado de manera general la interpretación de los resultados obtenidos.

Tabla 2 – Cuadro comparativo ventajas y desventajas, ensayo Método Sónico (PIT).

Ventaja	Desventaja
Mínima preparación del pilote previo a realizar el ensayo.	La relación L/D, limita los pilotes en los cuales se pueden obtener resultados claros.
Relativamente rápido. Se pueden ensayar gran número de pilotes por día.	Resultados de señales complicadas y/o poco concluyentes, requieren una evaluación compleja.
Entrega información de la ubicación (en profundidad) y posible gravedad de defectos mayores.	Las dimensiones exactas de un defecto no pueden ser estimadas con precisión. No se puede tener información confiable por debajo de un cambio de impedancia significativo.
Los pilotes a ensayar se pueden definir luego de ser hormigonados.	La precisión para estimar el largo del pilote (reflexión de punta) o profundidad de una anomalía depende del valor de velocidad de onda supuesto.
El ensayo es el más económico de su ámbito, lo que permite la posibilidad de evaluar todos los pilotes de un proyecto.	Pilotes de diámetro mayor a un metro pueden no ser analizados adecuadamente con este ensayo.

4 Resultados de casos reales aplicando ambos ensayos

Se realizaron ensayos de integridad en los pilotes de fundación de un estribo conformado por seis pilotes de diámetro $\phi = 150\text{cm}$ con una longitud aproximada de 17.0m. Se instalaron cuatro tubos de auscultación en el pilote para realizar el ensayo CSL. Se realizó un ensayo PIT en el mismo pilote ensayado con CSL, para comparar los resultados entregados por ambos métodos. El pilote ensayado se encontraba descabezado y a nivel del emplantillado, los tubos de auscultación sobresalían aproximadamente 2.0m por sobre la cabeza del pilote (ver Fig. 4).

La reflexión de punta obtenida en el ensayo PIT se observa a una profundidad muy similar al largo ejecutado del pilote lo que indica que el valor utilizado de velocidad de onda del hormigón es adecuado, además no se observan reflexiones secundarias o variaciones en el reflectograma que indicaran algún cambio de impedancia. En todos los perfiles medidos en el ensayo CSL, los perfiles de tiempo de llegada de la onda (FAT) y energía relativa no presentaban variaciones significativas, por lo que se trata de un pilote sin anomalías.

Al comparar los resultados obtenidos en el pilote del estribo del puente se observa que en ambos ensayos no se detecta ninguna anomalía y que ambos resultados son congruentes entre sí, pues no se observan zonas en las que un ensayo detectara una anomalía y en el otro ensayo no. Como evaluación final, en el caso del ensayo CSL el pilote se clasificaría como un pilote aceptable sin anomalías y en el caso del ensayo PIT se clasificaría como un pilote aceptable clase AA.

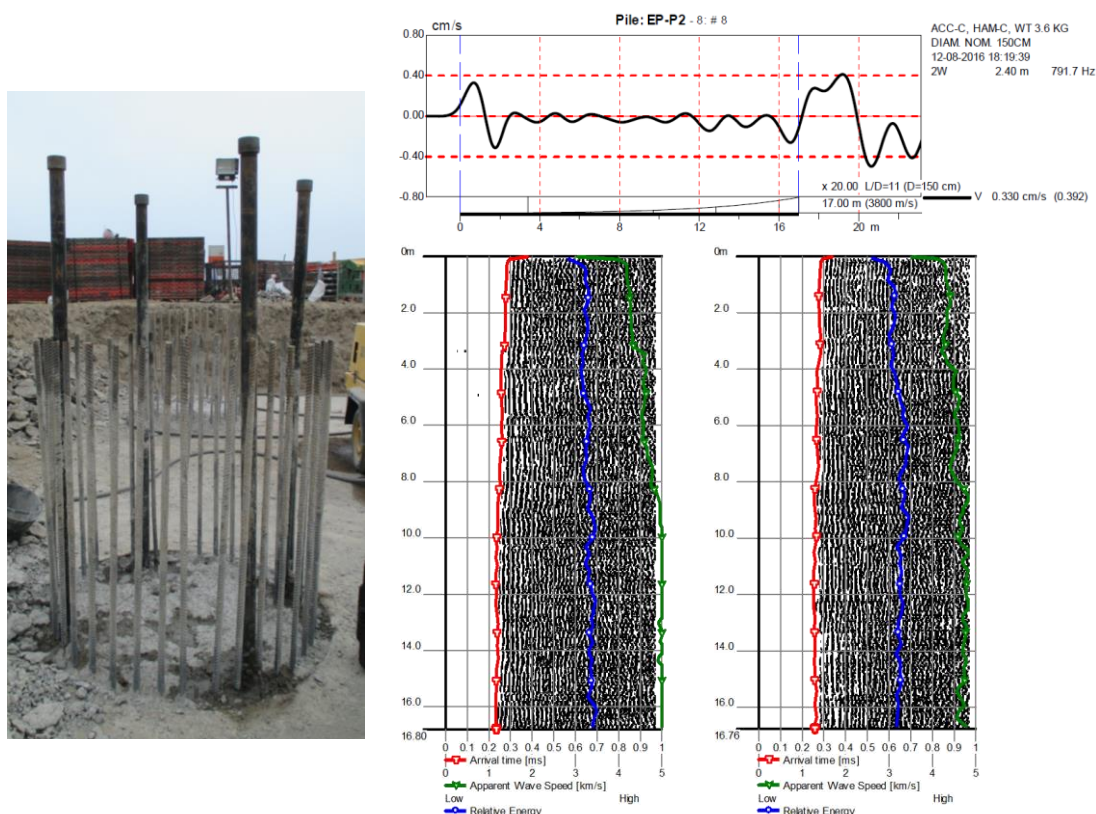


Fig. 4 – Pilote ensayado en estribo (izq.), resultado reflectograma PIT (arriba) y perfiles diagonales del ensayo CSL (abajo)

En otro proyecto, se realizaron ensayos PIT a los pilotes de fundación. La misma estaba conformado por seis pilotes de diámetro $\phi = 150\text{cm}$ con una longitud aproximada de 25.0m. Los pilotes ensayados se encontraban descabezados y a nivel del emplantillado.

En el reflectograma de unos de los pilotes (Fig. 5) se observa la reflexión de punta del pilote a una profundidad similar al largo ejecutado del pilote lo que indica un el valor de velocidad de onda del hormigón adecuado, sin embargo se aprecia otra reflexión antes de la punta del pilote la cual estaría asociada a un cambio de la impedancia, analizado como a un leve estrechamiento de la sección. El pilote fue finalmente clasificado como clase AB(20.0m).

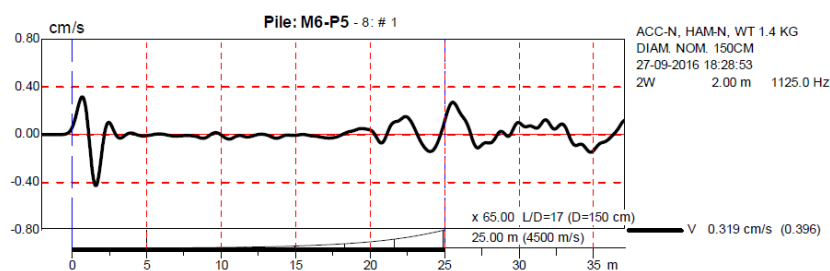


Fig. 5 – Resultado reflectograma PIT de pilote en muro de protección.

En otro caso, se realizaron ensayos CSL a los pilotes del estribo de entrada de un paso superior. Los pilotes tenían diámetro $\phi = 150\text{cm}$ con una longitud aproximada de 44.5m y cada pilote tenía instalado cuatro tubos de auscultación. En los perfiles obtenidos en uno de los pilotes, se observaron varias anomalías a lo largo del pilote (ver Fig. 6) clasificando una como anomalía mayor. Se pudo observar que la ubicación a las que se detectaban las anomalías coincidía en varios perfiles, lo que podría relacionarse a problemas durante el hormigonado y/o hormigón contaminado con suelo.

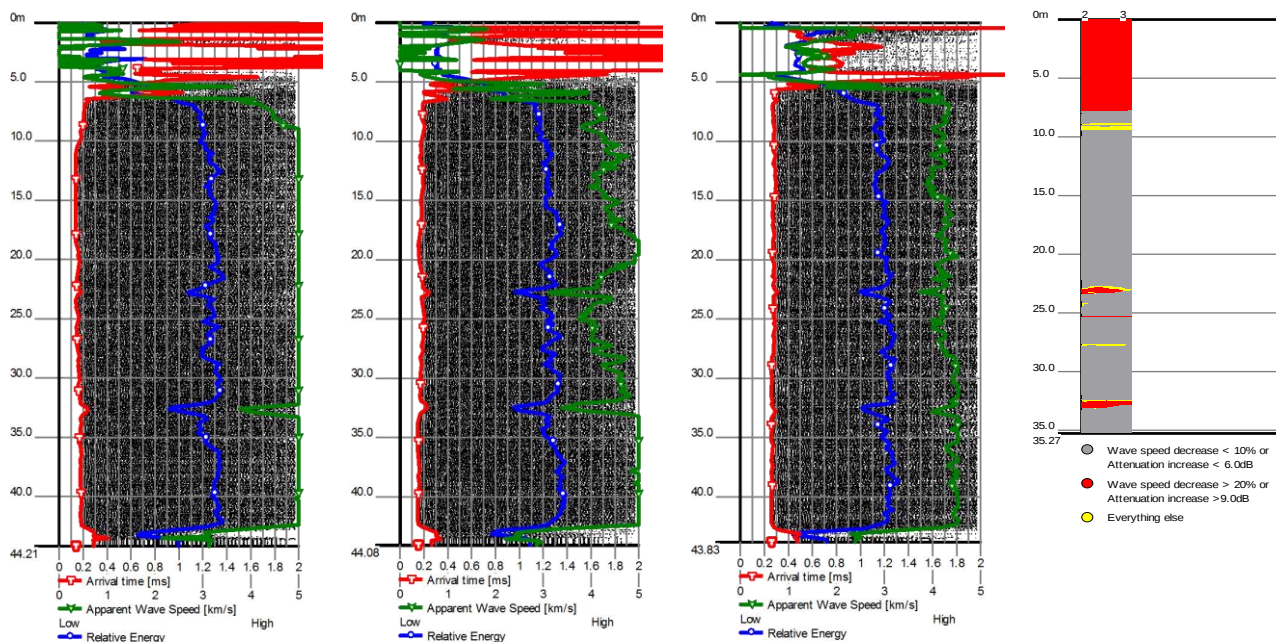


Fig. 6 – Perfiles obtenidos de ensayo CSL y tomografía realizada en uno de los perfiles en un pilote de estribo de entrada.

Gracias a la información proporcionada por el ensayo CSL, se pudo determinar la ubicación y extensión aproximada de las anomalías detectadas, las cuales fueron informadas al cliente para el posterior análisis del impacto de dichas anomalías en la capacidad estructural de los pilotes del proyecto.

5 Conclusiones

Los ensayos de integridad Crosshole (CSL) y de método sísmico (PIT), son herramientas de gran ayuda para el control de calidad de fundaciones de pilotes de hormigón armado con el objetivo de evaluar la continuidad y homogeneidad del hormigón de manera cualitativa.

El ensayo PIT requiere de una preparación mínima del pilote para ser ensayado y es relativamente un ensayo económico que puede realizarse prácticamente en todos los pilotes de un proyecto. Sin embargo existen limitaciones propias del método de ensayo que pueden causar resultados complicados de analizar o no concluyentes. Si se detecta un cambio de impedancia importante (pilote con defecto) es posible que no se obtenga más información por debajo de esta anomalía.

El ensayo CSL requiere de mayor preparación del pilote previo a ser ensayado en comparación del ensayo PIT, pero entrega mayor información acerca de la ubicación y extensión de una anomalía mayor ó defecto, además de que se pueden seguir obteniendo información del pilote por debajo de dicha anomalía. La información que se obtiene del hormigón está limitada al hormigón contenido entre tubos de auscultación y su entorno.

Ejecutando ambos ensayos sobre un mismo pilote, observamos que ambos ensayos entregan resultados coherentes ente si, pudiéndose en ambos casos verificar la continuidad del pilote en toda su longitud.

Dada la facilidad y velocidad de ejecución de estos ensayos además de la valiosa información de los pilotes que se obtiene de ellos, se debería de ensayar el 100% de los pilotes de un proyecto.

Independientemente de cual ensayo se utilice para verificar la integridad de un pilote, se deben tener presente sus limitaciones al momento de interpretar los resultados, los cuales pueden no ser concluyentes.

6 Referencias

- [1] ASTM Standard D 6760, Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing. ASTM International, 2008.
- [2] Centro de Estudios y Experimentación de obras Públicas (CEDEX). Recomendaciones para la ejecución e interpretación de ensayos no destructivos para el control de la integridad de pilotes y pantallas in situ. Ministerio de Fomento, España.
- [3] Amir, Joram M., Erez I. Amir, and Conrad W. Felice. Acceptance criteria for bored piles by ultrasonic testing. *Proceedings International Conference on Application of Stress Wave Theory to Piling*. 2004.
- [4] Amir, J. M., and E. I. Amir. Capabilities and limitations of Cross Hole ultrasonic testing of piles. *Proceedings of the Conference on Contemporary Topics in Deep Foundation, Orlando*. GSP. Vol. 185. 2009.
- [5] Tadeo, C. Fernández. Los ensayos de integridad estructural de pilotes: 20 años de experiencia en España. *Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente* 229 (2013): 24-27.
- [6] ASTM Standard D 5882, Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations. ASTM International, 2007.
- [7] Liang, L., Rausche, F. Quality Assessment Procedure and Classifications of Cast-In-Place Shaft using Low Strain Dynamic Test. *Proceedings from Deep Foundations Institute 36th Annual Conference on Deep Foundations*. Boston, MA; 553-562. 2011
- [8] Rausche, F., G. Likins, and R. K. Shen. Pile integrity testing and analysis. *Memories Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*. The Netherlands. 1992.