



EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL EN CIMENTACIONES PROFUNDAS MEDIANTE PRUEBAS DE PULSO COMBINADO

José Luis Rangel Núñez¹, Paniagua Zavala Walter Ivan² y Enrique Ibarra Razo³

RESUMEN

Se presenta en este artículo la descripción y principios de operación de una técnica de evaluación para cimentaciones profundas denominada prueba de integridad de pulso combinado y análisis de impedancia. Mediante la prueba de integridad es posible valorar la calidad estructural de una cimentación profunda, en especial las pilas coladas *in situ*. Dado que es una prueba económica, rápida y no destructiva, puede utilizarse como un sistema de control en tiempo real de los elementos de las cimentaciones profundas coladas *in situ*. Asimismo, se describen ejemplos de aplicación en nuestro país, donde se muestran las capacidades y bondades de la técnica.

ABSTRACT

The impulse response spectrum and impedance log analysis integrity test is described. This technique is a non destructive method useful to evaluate the integrity of a pile. It is possible to distinguish between generally oversized shaft sections, bulges, and neck ins, to determinate the approximate percentage of the cross-section affected, the shaft length and the approximate thickness of anomalies, such as inclusions or honeycombs, but not cracks. Two examples are described to show the potential of this technique.

INTRODUCCIÓN

En la última década, se han construido o se encuentran en construcción en las grandes ciudades del país hoteles y edificios multifuncionales que albergan centros comerciales y deportivos, departamentos unifamiliares, oficinas y centros de negocios. Su construcción conlleva un elevado número de entresijos así como excavaciones profundas para alojar sótanos de estacionamientos. Las sollicitaciones estáticas y sísmicas en la cimentación bajo tales condiciones requieren la construcción de cimentaciones profundas que alcanzan cada vez con mayor frecuencia depósitos profundos compactos, empotrándose en éstos algunos metros; con ello el diseñador busca obtener suficiente resistencia del trabajo por fuste para tomar las tensiones generadas durante los eventos sísmicos. No solo en las ciudades se emplean con frecuencia las cimentaciones profundas; éstas tienen gran auge en puentes y obras costeras también.

Las pilas son un tipo de cimentación profunda, que a diferencia de los pilotes, se construyen en el lugar; es decir, son coladas *in situ*, por lo que en la ingeniería práctica existe incertidumbre sobre su integridad, es decir, la condición de continuidad de la pila, su longitud y forma, y la calidad del concreto.

Una técnica sencilla y rápida para conocer o evaluar cualitativamente la calidad estructural de una pila es realizar pruebas de integridad con pulsos u ondas de impacto generadas en su cabezal.

-
- 1 Investigador-Profesor, Universidad Autónoma Metropolitana, Plantel Azcapotzalco, Av. San Pedro No. 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Azcapotzalco, CP. 02200, México DF. Tel. (55) 5318-9358; jrangeln@correo.azc.uam.mx.
 - 2 Director General, Pilotec SA de CV, Eje 10 Sur 444 Aviñón 4-403, Col. Pedregal de Coyoacán, CP. 04320 México DF. Tel. (55) 5549-8499; pilotec@prodigy.net.mx, www.prodigyweb.net.mx/pilotec.
 - 3 Director, inGeum SA de CV, Itzolinque 19B, Planta Baja, Col. San Francisco, CP. 04350, México DF. Tel (55) 5658-7954; ingenium@terra.com.

En este trabajo se describen las bases de la técnica y su aplicación en México, con lo cual se subraya el potencial de aplicación como aseguramiento de calidad y control de este tipo de cimentación profunda.

ANTECEDENTES

El control de calidad de una cimentación profunda, ya sean pilas o pilotes, se puede llevar a cabo con pruebas de carga estática (pruebas de compresión, de tensión, de carga lateral o alguna combinación de éstas) o pruebas de carga dinámica.

Desafortunadamente, estos procedimientos requieren un tiempo de planeación que pocas veces se contempla en los proyectos; aunado a ello, el costo de pruebas de carga estática puede ser oneroso por lo que desafortunadamente solo se emplean en casos especiales cuando la importancia de la obra lo amerita. Por tanto, es necesario recurrir a técnicas económicas y rápidas, que nos den una primera idea de la calidad de la cimentación. Una alternativa de inspección de la calidad de la pila son las pruebas de integridad.

La prueba de integridad se aplica principalmente a pilas, donde existe incertidumbre sobre su continuidad y calidad, aunque existen casos donde se ha aplicado a pilotes, para verificar su longitud o la condición de continuidad en las juntas.

El ensaye es del tipo no destructivo, dado que se induce en el cabezal de la pila una deformación muy baja, producida por el impacto de un martillo manual de masa pequeña. La evaluación de la integridad se hace a partir de los registros obtenidos con el impacto, en el dominio del tiempo o de la frecuencia, con el propósito de detectar posibles defectos o anomalías en la construcción de las pilas. Las anomalías detectables son discontinuidades, cambios significativos en el material que conforma el elemento de cimentación o cambios en la sección transversal del mismo.

TIPOS DE PRUEBAS DE INTEGRIDAD

En la actualidad existen un total de seis tipos de pruebas de integridad, las cuales se citan a continuación, en orden creciente de complejidad y costo (Deep Foundations Institute, 2004):

1. Pulso simple. El cabezal de la pila se instrumenta exclusivamente con un acelerómetro y se genera una onda compresional mediante un martillo manual. El velocigrama obtenido es analizado en el dominio del tiempo.
2. Pulso combinado. Es semejante al anterior pero el martillo se instrumenta con celda de carga o acelerómetro mediante el cual se mide la magnitud aplicada y su disipación en el tiempo. El análisis del velocigrama se realiza tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia.
3. Pulso combinado y análisis de impedancia. Es similar al pulso combinado pero se complementa con el análisis de los datos mediante un modelado analítico de la pila basado en los cambios de impedancia que pudieran suceder a lo largo de la pila.
4. Micro down-hole. Es el método geofísico down-hole aplicada a una pila. En efecto, durante la construcción de la pila, se deja un tubo de PVC en su parte central. Posteriormente, se llena de agua y se coloca el hidrófono a diferentes profundidades. Para cada profundidad, se genera un pulso en superficie, el cual posteriormente se va registrando su arribo a las distintas profundidades donde es colocado el hidrófono.
5. Micro cross-hole. Al igual que el método previo, esta técnica es la aplicación del método geofísico a una pila.
6. Micro gama-gama. Al igual que los dos métodos anteriores, esta técnica nace de la aplicación del método geofísico gama-gama en una pila. Aquí, mediante la radiación de rayos gama es posible estimar la variación de la densidad del concreto de la pila con respecto a la profundidad.

Actualmente, la técnica con mayor aplicación en la valoración de la integridad de la pila es la de pulso combinado y análisis de impedancia, debido a que es económica, rápida, no requiere dejar preparaciones



durante la construcción de la pila y de confiabilidad alta. A continuación se realizará una descripción con mayor detalle de dicha técnica.

FUNCIONAMIENTO

La prueba de integridad del tipo de pulso combinado y análisis de impedancia es un ensayo que trata principalmente de determinar la variación de las características del concreto de las pilas de cimentación en toda su longitud. La forma usual del ensayo consiste en la colocación de un acelerómetro de alta sensibilidad en la cabeza de la pila bajo prueba, y en la aplicación de golpes con un martillo instrumentado (Fig. 1).



Figura 1 Equipo de la prueba de integridad

El acelerómetro se fija a la cabeza por medio de un material viscoso, generalmente cera de petróleo. Los golpes del martillo generan una onda de compresión, que recorre la pila y sufre reflexiones al encontrar cualquier variación en las características del material (cambio de sección, peso específico, módulo de elasticidad, entre otros). Esas reflexiones causan variaciones en la aceleración medida por el sensor. El equipo hace un registro de la evolución de esa aceleración con el tiempo (es usual trabajar con la velocidad de onda, mediante la integración de la señal de aceleración).

Como la onda hace su recorrido con una velocidad fija (velocidad del concreto), al conocerse esa velocidad de propagación y el tiempo transcurrido entre la aplicación del golpe y la llegada de la reflexión correspondiente a las anomalías o a la punta, es posible determinar la localización exacta de éstas.

Es usual la aplicación de varios golpes secuenciales a fin de que el equipo de la prueba de integridad obtenga un promedio de las señales correspondientes. Ello permite eliminar interferencias aleatorias, efectos anómalos o señales espurias, sobresaliendo en la señal las variaciones causadas por las reflexiones de la onda.

Las vibraciones superficiales son grabadas en la parte superior del cabezal de la pila así como todas las reflexiones primarias. Considerando la naturaleza y los tiempos de observación de las reflexiones, es posible valorar la integridad de la pila y detectar anomalías francas como las mostradas en la Fig. 2.

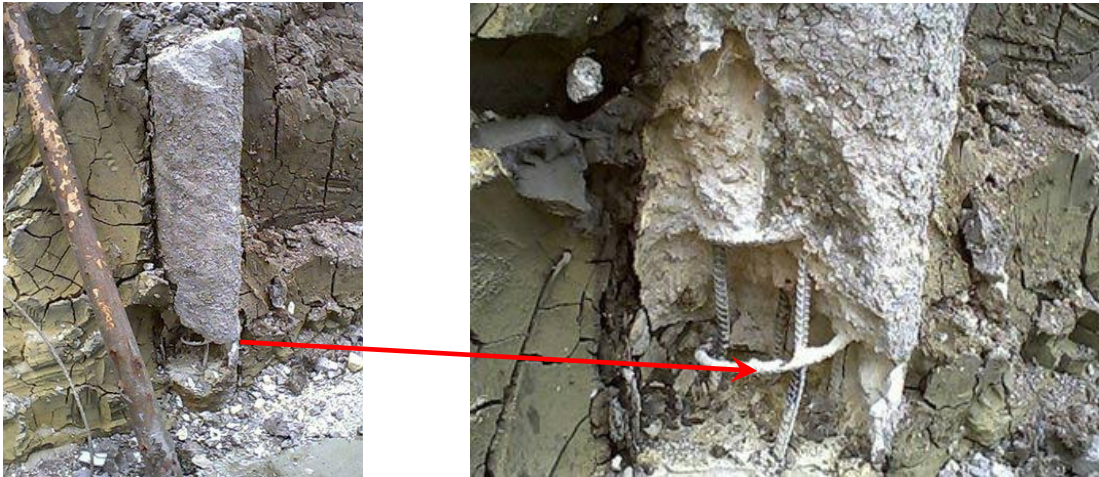


Figura 2 Ejemplo de anomalías detectables con el ensayo de integridad

El reflector más profundo es la punta de la pila (parte baja), por lo que su reflexión es la última que puede observarse. Dada una estimación de la velocidad de onda compresional del material que está compuesta la pila, C , y su longitud, L , la reflexión de la pila es esperada al tiempo $t=2L/C$.

Las reflexiones se observan mediante un acelerómetro removible, temporalmente adosado en el cabezal de la pila. La aceleración de la señal es digitalizada y almacenada en el equipo colector. Asimismo, la aceleración es numéricamente integrada para producir un velocigrama.

Por otra parte, midiendo la aceleración del martillo y al multiplicarla por su masa, es posible conocer el valor de la fuerza aplicada, F . Durante el impacto, cuando el martillo y la pila están en contacto, la fuerza es proporcional a la velocidad esperada del cabezal de la pila. La constante de proporcionalidad es la impedancia acústica en el cabezal, Z .

El cociente F/Z es llamado velocidad y es presentado conjuntamente con la velocidad observada V . Ambas deben tender a ser iguales durante el impacto. La fuerza grabada después del impacto no tiene aún un significado práctico desde el punto de vista de la integridad de la pila.

Para facilitar la localización de los reflectores, la señal se presenta en función de la distancia medida desde el punto de impacto.

Las reflexiones son generadas por las variaciones de la impedancia de la pila, Z , que puede calcularse con $Z=\rho CA$, donde A es el área transversal de la pila y ρ es la densidad del material que la conforma. Por tanto, al cambiar el producto ρC (cambio del material) o el área, cambia la impedancia y se generan reflexiones.

Dada la geometría de la pila (como son su área transversal y longitud), es posible detectar irregularidades, como variaciones de la sección transversal a lo largo del fuste y los cambios en el tipo de material, mediante la interpretación del comportamiento anómalo observado entre la señal incidente y el reflector de la punta, Fig. 3.

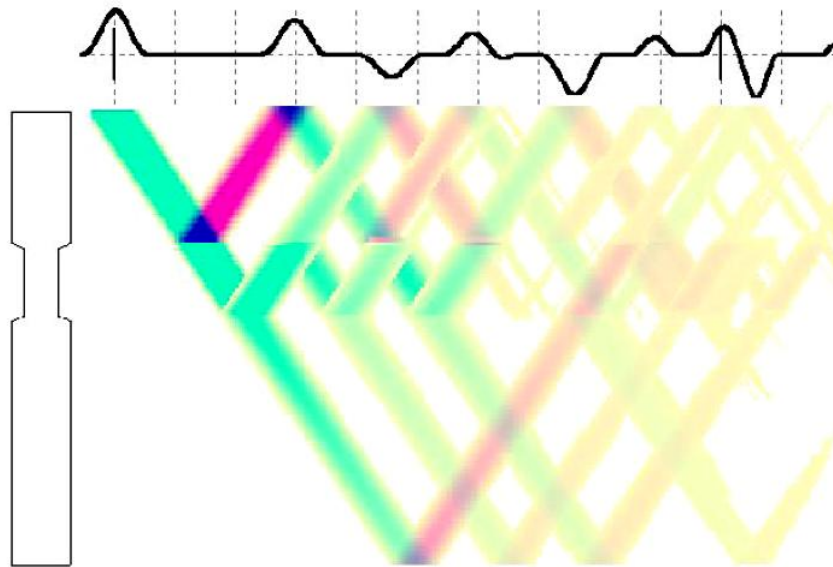


Figura 3 Esquema de la reflexión de ondas en caso de disminución de sección de una pila

Los detalles del planteamiento teórico y desarrollos de la técnica se discuten en la literatura técnica (Rausche y Goble, 1979; Reiding *et al.*, 1984; Davis y Hertlein, 1991, Rausche *et al.*, 1991 y Rausche *et al.*, 1992).

Criterio de aceptación o rechazo de la prueba. Se basa en la calificación de la forma del velocigrama obtenido después de realizar el ensaye. Es necesario verificar la inexistencia de ruido y señales espurias presentes en el registro. En caso de que el velocigrama resultante de la prueba no sea claro y limpio, se debe de rechazar el ensaye, o realizarse nuevamente en diferentes puntos del cabezal de la pila hasta lograr un velocigrama claro y limpio. En caso de continuar el ruido, debe de localizarse su origen y si es superficial deberá corregirse.

Equipo. Se conforma de los siguientes elementos (Fig. 4): acelerómetro, martillo de impacto instrumentado con masa conocida y el equipo colector.



Figura 4 Equipo utilizado para las pruebas de integridad

Es importante comentar que el equipo debe de cumplir con las especificaciones establecidas por la norma ASTM D-5882 y es necesario que se prepare la superficie del los cabezal de la pila para eliminar cualquier fuente de error o señales espuria. La preparación de la superficie del cabezal consiste en eliminar la zona alterada en el cabezal, llevar a cabo su nivelación, pulir la superficie donde impactará el martillo y se adherirá el acelerómetro, y cortar, en la medida de lo posible, el armado que aflora.

Resultados e interpretación. La interpretación de los registros de campo se realiza con la ayuda de la solución de la ecuación de onda cuando un pulso se propaga a través de una pila. En la actualidad existen diferentes programas comerciales que facilitan este proceso.

Los resultados del ensaye (calidad y perfiles geométricos de la pila), se basan en la interpretación del velocigrama y el perfil de fuerzas, considerando un modelo teórico, por lo que deben de tomarse con precaución, reforzando principalmente la interpretación cualitativa que debe de hacerse de la pila. La validez del perfil mostrado depende de muchos factores, como la homogeneidad de la pila y del suelo que la rodea, una visión promedio de toda la periferia de la pila, existencia de simetría de las irregularidades de la sección, por mencionar algunos, por lo que, no es recomendable considerarlo de manera cabal, sino como una orientación de su calidad. La calificación de la calidad de la pila se agrupa en 4 familias:

- A. **Pila Buena:** No se aprecian defectos obvios y la respuesta de la punta de la pila es clara para longitudes de pila de hasta 30 diámetros.
- B. **Pila Mala:** Existe una identificación clara de defectos en la pila y no se aprecia claramente el reflector de la punta de la pila después de eliminar el ruido de la señal, aun cuando se cumple con el criterio de que la longitud de la pila es menor que 30 veces su diámetro. En tales casos, para poder descartar una pila es recomendable llevar a cabo pruebas de detalle (pruebas de carga y/o sondeos de inspección), analizar profundamente su historial constructivo, así como realizar correcciones de la pila en el caso de que los defectos se ubiquen superficialmente y volver a efectuar los ensayes de integridad.
- C. **Pila con posibles defectos.** Los defectos en la pila no son claros. Es necesario llevar a cabo pruebas de integridad adicionales después de aplicar medidas correctivas en caso de que los defectos se localicen en la parte superior (gran longitud del armado que sobresale en el cabezal, imperfecciones del cabezal, deficiencia en el pulido de la superficie del cabezal en la zona donde se coloca el acelerómetros, etc); y en caso que los posibles defectos persistan será necesario llevar a cabo pruebas de carga o sondeos directos (extracción de núcleos) para poder descartar dicha pila.
- D. **Datos no concluyentes.** No se tienen registros de calidad debido a imperfecciones en el cabezal de la pila (armado que sobresale, superficies mal pulidas, contaminaciones en el cabezal), a la alta resistencia del terreno localizado a lo largo de la pila o debido a la longitud de la pila por lo que el pulso reflector de la punta no sea observable (un criterio empírico para definir la longitud máxima de la pila para que pueda observarse dicho pulso reflector es que la longitud de la pila sea menor que 30 veces su diámetro).

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

A fin de ilustrar la aplicación del método se describe un caso real donde fue posible conocer detalladamente las condiciones geotécnicas y el proceso constructivo de la pila

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Consiste básicamente de cuatro unidades, a saber:

- Superficialmente se tienen arenas finas color café claro con raíces, hasta 3.9m de profundidad. La resistencia a la penetración estándar de estos materiales varía de 2 a 11 golpes.
- Subyaciendo a la capa superficial arenosa y hasta 13.2m de profundidad, se encuentra un estrato de arena fina poco limosa, cuya resistencia a la penetración estándar aumente de 12 a 41 golpes.
- Subyaciendo al estrato anterior y hasta una profundidad de 23.4m, se tiene un depósito de arena fina a media poco limosa color gris verdoso oscuro, con resistencia a la penetración estándar promedio de 42 golpes.



- Finalmente, y hasta una profundidad de 51.6m, se tiene una formación de limo arenoso semicompacta a compacta de color gris verdoso oscuro. La resistencia a la penetración estándar de este estrato es de 33 golpes en promedio.

Así mismo, el Nivel de Aguas Freáticas, NAF, se encuentra a 3.5 m de profundidad medido a partir del nivel de terreno natural original.

PROCESO CONSTRUCTIVO DE LAS PILAS

Las pilas tienen una longitud variable entre 12 y 28m, con diámetro desde 0.8m hasta 1.8m. De acuerdo con las condiciones geotécnicas, el proceso de construcción de las pilas consistió en realizar la perforación utilizando un bote y estabilizando las paredes con lodo bentonítico. El colado se realizó con un tubo tremie con secciones de tubería de 3 a 6m de longitud, y adicionalmente, se colocó un ademe en la boquilla de la perforación cuya longitud y diámetro promedios fueron de 3 y 1.0m, respectivamente.

RESULTADOS

El primer caso estudiado se trata de una pila de 1.5m de diámetro y 25.2m de longitud. Dado que su longitud es menor que 30 veces el diámetro, se cumple con la regla empírica sobre la aplicación del método y es de esperarse obtener velocigramas útiles. En la Fig 5a se presenta el velocigrama obtenido, así como su interpretación (medición indirecta), y en la Fig 5b se muestra la variación del volumen de concreto empleado conforme se fue colándose la pila, lo cual puede dar una idea inicial sobre la existencia de ampliaciones o decrementos de la sección de la pila a todo lo largo (medición semidirecta). Se observa que en ambos resultados existen ligeras variaciones de la sección transversal de la pila con relación al perfil teórico, y en general, se obtiene que en la parte baja de la pila su sección presentan ampliaciones ligeras y cerca del cabezal reducciones. En este caso la calificación de la pila es buena, dado que no se observa ningún rasgo anómalo en el velocigrama ni en la sección interpretada que pueda atribuirse a una imperfección.

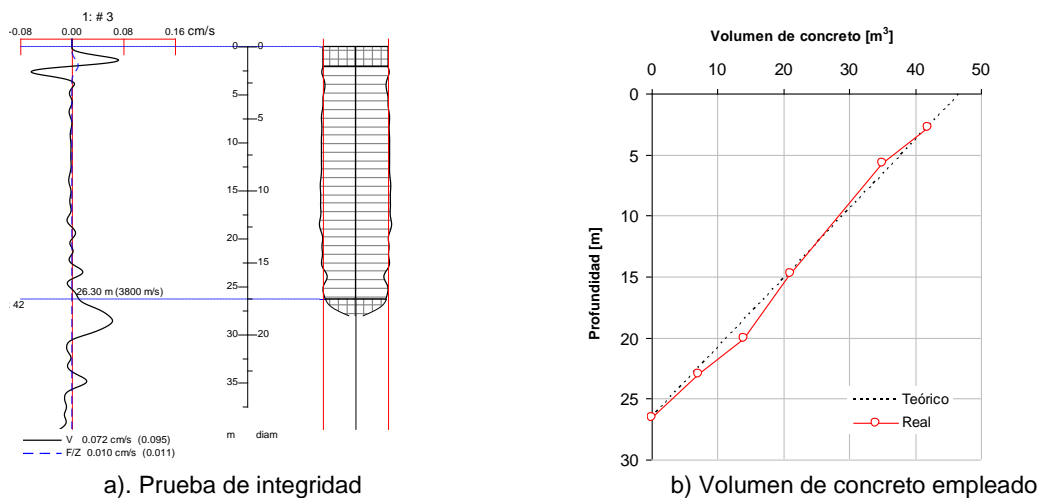


Figura 5 Ejemplo de aplicación 1

En el ejemplo siguiente se estudia una pila de 0.8m de diámetro y 26.1m de longitud, que no se cumple la regla empírica que indica que la longitud debe ser menor de 30 veces el diámetro, por lo que es de esperar que los resultados del ensaye de integridad no produzcan resultados confiables. En la Fig. 6 se presentan el velocigrama obtenido y su interpretación, así como la gráfica de variación del volumen colocado durante el colado de la pila. Se observa que la gráfica del volumen de concreto utilizado indica que se ha empleado mayor volumen de concreto con respecto al teórico, por lo que es de esperarse que existan ampliaciones de la sección de la pila, principalmente en la parte superior. Los resultados de la prueba integridad indican que en

efecto existen estas ampliaciones, pero se ubican en tres posiciones claramente definidas, cerca de la punta, en la parte intermedia y en la zona cercana al cabezal. Asimismo, se observa que en el velocigrama es posible reconocer claramente el pulso reflector de la punta, a pesar que no se cumple el criterio empírico.

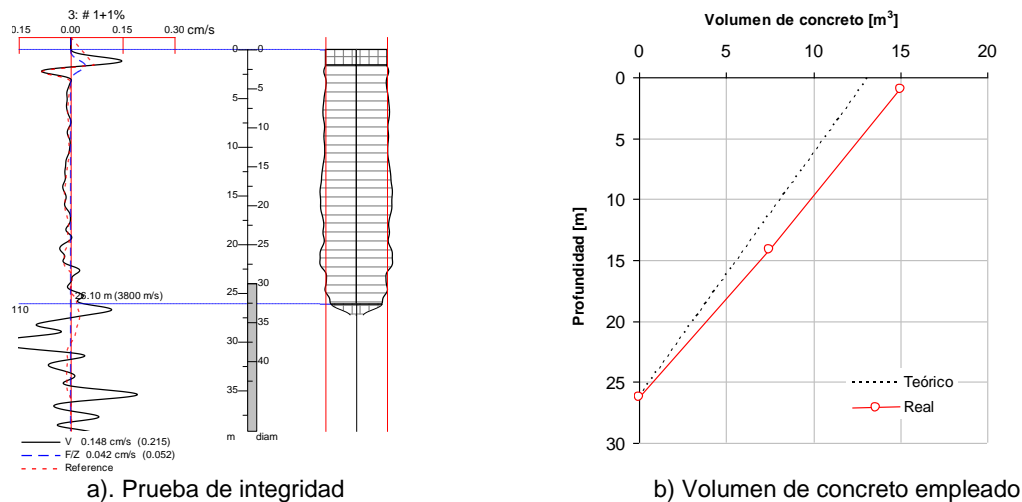


Figura 6 Ejemplo de aplicación 2

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha presentado una de las técnicas de integridad aplicable a las cimentaciones profundas, en especial a las pilas, mediante la cual puede valorarse de manera oportuna y económica la calidad de la pila.

Dado que la técnica puede utilizarse como un sistema de control en tiempo real, es posible elaborar una zonificación de las pilas construidas de acuerdo con su calidad, valorar la necesidad de llevar a cabo pruebas de carga, establecer un sistema de selección para estudios adicionales y retroalimentar el diseño.

REFERENCIAS

Davis, A.G. y B.H. Hertlein (1991). “**The development of small-strain methods for testing deep foundations: a review**”, Transportation Research Board, 70th annual meeting, Washington, DC.

Deep Foundations Institute (2004), **Manual for non destructive testing and evaluation of drilled shafts**. First edition. USA.

Rausche, F., y G.G. Goble (1979). “**Determination of pile damage by top measurements**”, Behavior of deep foundations, ASTM STP 670, (Raymond Lundgren, editor), ASTM, pp 500-506.

Rausche, F., R-K. Shen y G. Likins (1991). “**A comparison of pulse echo and transient response pile integrity test method**”, Transportation Research Board, 70th annual meeting, Washington, DC.

Rausche, F., G. Likins y R-K. Shen (1992). “**Pile integrity testing and analysis**”, Proceedings of the 4th International Conference on the applications of stress wave theory to piles, The Netherlands

Reiding, F. P. Middendrop y P. Van Brederode (1984). “**A digital approach to sonic pile testing**”, 2nd International stress wave theory to piles, Stockholm, Sweden.

