

Discontinuidades e irregularidades en pilas, detectadas con pruebas de integridad

Discontinuities and irregularities in piles, detected with integrity testing

Walter I. Paniagua, Pilotec
Asael Elvira Martínez, Pilotec
Enrique Ibarra, inGeum
José Luis González, inGeum
José Luis Rangel, UAM Azcapotzalco

RESUMEN: Se presenta una breve descripción de pruebas de integridad no destructivas realizadas en pilas de cimentación, empleando la técnica *PIT*. Se describen diversos casos en los que se analiza el velocigrama de la pila o pilote y su clasificación en términos de calidad; particularmente, se presenta un caso historia donde se valida y verifica el resultado del PIT con la extracción de una pila colada *in situ*, comprobando las bondades de esta técnica.

ABSTRACT: A brief description of non-destructive pile integrity tests is presented, PIT technique. Several examples are described, analyzing the pile velocigram, and its classification in quality terms; in particular, a case history is presented, where the PIT result is verified with the extraction of a drilled shaft, reinforcing the advantages of this technique.

1 INTRODUCCIÓN

Después de ejecutar más de 2,500 pruebas de integridad en pilas, se presentan las experiencias de los autores en mediciones e interpretaciones de pilas coladas *in situ* con defectos generados durante su construcción, como discontinuidades, cambios de sección transversal, acortamiento o alargamiento de la pilas, azolve en la punta, entre otras.

En principio, se describen las causas principales que provocan los defectos durante el proceso constructivo de las pilas; en algunos casos, se cuenta con un análisis visual de la pila ensayada, a fin de validar y corroborar los resultados obtenidos con las pruebas de integridad; en otros, se comparan los resultados de pilas sin defectos, generalmente aledañas a las detectadas con irregularidades, a fin de contrastar los velocigramas y reforzar la interpretación de los perfiles.

2 IMPORTANCIA DEL CONTROL DE CALIDAD EN LAS CIMENTACIONES PROFUNDAS

Dentro de los tipos de cimentación comúnmente utilizados se encuentran las cimentaciones superficiales (losas de cimentación, zapatas corridas o aisladas, etc.) y cimentaciones profundas (pilotes, pilas, etc.). Las cimentaciones superficiales generalmente son utilizadas para soportar estructuras livianas o de importancia secundaria, o cuando el terreno cuenta con estratos superficiales con suficiente capacidad portante y baja deformabilidad. Cuando los requerimientos de carga son mayores e insuficientes para soportarse con cimentaciones superficiales, se utilizan las cimentaciones profundas. Existen dos tipos principales

de cimentaciones profundas: los pilotes, que son elementos prefabricados hincados en el subsuelo y las pilas, que se construyen en el lugar.

Debido a que las cimentaciones profundas soportan cargas considerables, es importante establecer controles de calidad en su construcción. Desafortunadamente, no es posible llevar a cabo una inspección física, por lo que es importante vigilar cada una de las etapas del proceso constructivo y verificar la calidad de los materiales empleados para su construcción. No obstante los controles anteriores, frecuentemente es necesario llevar a cabo revisiones de la integridad de la pila una vez que se ha construido, ya sea empleando métodos directos o indirectos, como los que aquí se describen.

Los problemas más comunes presentados en las pilas son los estrangulamientos y/o ensanchamientos en su sección, diferencias entre la longitud real y la teórica, secciones contaminadas o presencia de burbujas de aire en el concreto, mala calidad del concreto utilizado, azolve en la punta, entre otros. Todos estos defectos se originan durante la construcción de la pila, y es por ello que se debe asegurar que su proceso constructivo sea óptimo. Otros defectos se pueden presentar durante la vida útil y pueden ser ocasionados al superar la capacidad de carga de la pila (tensión, compresión o lateral) o cuando se construyen en terrenos agresivos químicamente, con hundimientos regionales importantes, sismos fuertes, entre otros.

La problemática a la que se enfrenta el constructor de pilas de cimentación, es la incertidumbre de la calidad final del elemento fabricado. De acuerdo con PDI (2010), aproximadamente el 80% de las pilas fabricadas presentan algún tipo de problema en su integridad.

3 TIPO DE PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS PARA PILAS DE CIMENTACIÓN

Dentro de los tipos de pruebas no destructivas para el control de calidad en pilas, se tienen las pruebas: acústicas, radiométricas, sísmicas, onda de tensión, respuesta dinámica y eléctricas (Fleming *et al.*, 2009). Los ensayos comúnmente utilizados son: la prueba de pozo cruzado o *Cross-Hole Sonic Logging* (CSL), y los de baja defromación o *Low Strain Test* (LST, PIT).

3.1 *Cross Hole Sonic Logging* (CSL)

La prueba de pozo cruzado utiliza una señal de sonido que mide la velocidad de la onda entre dos tubos de PVC o acero, colocados antes del colado de la pila, previendo que los tubos sean verticales y paralelos entre sí. Este método provee resultados válidos para elementos de casi cualquier longitud. Dado que se conoce la distancia entre barrenos y la velocidad de onda del concreto, es posible determinar el tiempo que tardaría de pasar la onda del tubo transmisor al receptor. Si este tiempo difiere, existe algún desperfecto de la pila en ese punto de medición. Las medidas son usualmente tomadas a cada 2" (son posibles distancias menores) que da una mejor resolución para identificar los defectos verticales en una misma distancia.

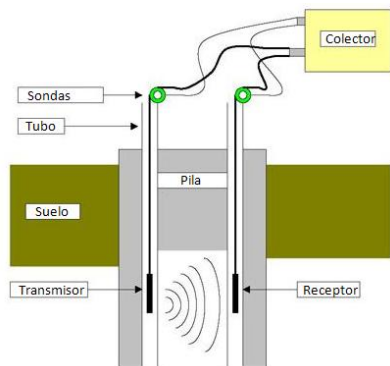


Figura 1, Diagrama de la prueba Cross-Hole

Al colocar diferentes tubos y medir en diferentes posiciones de manera simultánea, es posible obtener información de la integridad de la pila prácticamente en cualquier punto de la sección. En la Fig 1 se muestra un diagrama esquemático para la prueba *Cross-Hole*.

3.2 Prueba de integridad PIT

El método de bajo impacto o PIT, requiere como su nombre lo dice de un impacto ligero, como el de un martillo de mano, en el cabezal de la pila. Este impacto genera una onda que es detectada en el cabezal mediante un acelerómetro. Posteriormente, esta onda

viaja por todo lo largo y ancho de la pila, y al llegar a sus fronteras (paredes y punta) se provocan reflexiones que regresan la energía hacia el cabezal, donde nuevamente son detectadas por el acelerómetro. Si la pila es continua y homogénea, y el pulso generado en el cabezal es vertical, situación que en general se cumple, el acelerómetro detectará en principio la onda que se genera en el cabezal y posteriormente la onda reflejada en la punta de la pila. Si existe un desperfecto en la pila, este provoca pulsos reflectores distintos a los de una pila sana, que llegan antes del pulso reflector de la punta. Asimismo, si la longitud de la pila es mayor a la teórica (la de diseño, por ejemplo), o la calidad del concreto es menor, el pulso reflector de la punta llegará retrasado con respecto a lo esperado.

El resultado de la prueba PIT es un velocigrama, donde es posible visualizar con mejor claridad los pulsos generados en el cabezal, en la punta o por los desperfectos existentes en la pila. A fin de facilitar su interpretación este se amplifica y filtra.

En la Fig. 2, se muestra el equipo utilizado para la ejecución de las pruebas de integridad. La masa del martillo varía entre 0.5 y 3 kg y normalmente está cubierta en el área de impacto por una masa de nylon duro que genera frecuencias de impacto debajo de 5,000 Hz; en la Fig. 3 se muestra el funcionamiento general de la prueba.



Figura 2, Equipo de pruebas de integridad, acelerómetro, martillo y colector de datos.

La prueba PIT tiene la ventaja de aplicarse a cualquier pila sin necesidad de llevar a cabo preparaciones costosas, en tiempo principalmente, así como permitir una selección arbitraria y razonable de las pilas a ensayar.

Uno de los criterios de selección de las pilas a probar, es escoger aquellas donde los registros de colado sean dudosos, pero también es sano la selección arbitraria a fin valorar la calidad general de un conjunto de pilas. En la Tabla 1 se indican los factores principales que afectan a los registros, y por tanto, a los resultados del

PIT. Estos factores tienen que ser revisados durante la prueba y en el proceso de interpretación. Con la finalidad de la simplificación del reporte y una mejor comprensión del usuario del mismo, los registros de las pilas son normalmente clasificados (Raausche *et al.*, 1992). En principio, es conveniente que la calificación de la pila se haga en términos simples y sencillos, como la clasificación siguiente:

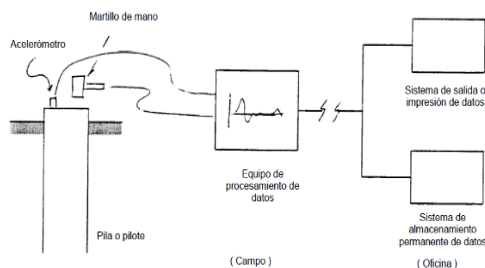


Figura 3, Esquema del sistema de instrumentación para la prueba de integridad de pilas y pilotes.

Tabla 1, Factores que influyen en los resultados de pruebas PIT

Elemento afectado	Causas
Los registros de los movimientos de la cabeza de la pila.	Contaminación, pérdida de la dureza del concreto en la cabeza de la pila. Superficie de impacto suave. La elección del tipo de martillo, la altura del golpe, el amortiguamiento del mismo. La localización del impacto en la cabeza de la pila. El método y fuerza del movimiento del sensor. La calidad, amplificación y resolución del equipo de procesamiento de los datos.
El procesado de los registros de los movimientos de la cabeza de la pila.	El número y consistencia de los registros individuales promediados. Los métodos de procesamiento digital de datos, tal como la magnitud de la amplificación exponencial, el aplastamiento y enderezamiento de la curva.
La interpretación de los registros.	Los métodos de análisis disponibles El número de pilas ensayadas.
El límite del método se alcanza cuando, ...	Cuando a cierta profundidad la reflexión de la onda alcanza una magnitud imperceptible debido a la humectación interna (concreto joven) o resistencia externa (suelo). Cuando hay un cambio en la sección de la pila o la calidad en el concreto, una grieta o junta.

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, 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 el historial de construcción de la pila, así como realizar correcciones en el caso de que los defectos se muestren superficialmente y volver a efectuar los ensayos 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).

Si las pilas son clasificadas como "A", no es necesario llevar a cabo ensayos detallados. Cualquier otro resultado requerirá pruebas adicionales o de una interpretación detallada. La revisión por ingenieros experimentados en la interpretación de los datos procesados es altamente recomendada. Esto sólo es posible si los registros se encuentran completos (amplificación, filtros, magnitudes de velocidades, etc.). En la norma ASTM-5882 se describen los requerimientos mínimos para una prueba se realice correctamente. Esta norma nos da los datos de cómo realizar la interpretación y el reporte de una prueba (Likins, *et al.*, 2007).

4 ENSAYO DE PRUEBA DE INTEGRIDAD PIT EN PILAS DE CIMENTACIÓN

El ensayo de la prueba de integridad en pilas consiste en la aplicación de pequeñas deformaciones a la cabeza de una pila o pilote mediante un martillo instrumentado, en este caso la masa del martillo es de 0.9 kg; Ésta señal viaja a través del concreto a una velocidad de aproximadamente 3800 m/s, y la onda se refleja en cuanto localiza una discontinuidad en el concreto, ya sea un aumento en la sección de la pila, una disminución de la misma, contaminación del concreto por azolve o la parte final de la pila (la punta).

La preparación previa a la ejecución de la prueba consiste en retirar la capa de concreto alterada o fisurada, posteriormente realizar el pulido de una superficie de 10 a 20 cm de diámetro en el centro del cabezal de la pila. Deberá ser una superficie seca y libre de polvo; posteriormente, se adhiere con cera de petróleo un acelerómetro que recibirá las reflexiones de las señales cada vez que detecten discontinuidades en el concreto.



Figura 4. Ejecución de prueba de integridad.

En cada ensayo se aplican golpes en el cabezal. El número de golpes pueden ser hasta seis. Cada golpe genera un registro que deben filtrarse a fin de eliminar señales espúrias. Es importante tener registros claros ya que facilitará su interpretación. De los registros generados se obtiene uno promedio, que es el que finalmente se interpretará.

El número de golpes, la altura y posición a la que se coloque el martillo para la aplicación de las deformaciones, así como el número de ensayos a considerar dependerán de la técnica y de la experiencia del ejecutor de la prueba

5 DESPERFECTOS EN PILAS DE CIMENTACIÓN DETECTADOS CON EL PIT

Los desperfectos en las pilas, como se menciona previamente, son en su mayoría el producto de los errores durante la construcción. En efecto, la selección

inadecuada del método de colado, la dosificación errónea del concreto, la permanencia de la tubería *tremie* embebida dentro del concreto de la cual se derivan las contaminaciones en las pilas si éste requerimiento no se cumple, una mala calidad del concreto que se recibe de la planta, su revenimiento, la continuidad en el colado, es decir, que el suministro del concreto sea continuo, sin esperar a que empiece a fraguar el primer concreto vaciado.



Figura 5. Preparación de la superficie de la pila para ejecución de prueba.

Los desperfectos de las pilas que se pueden localizar mediante la prueba de integridad son los ensanchamientos y estrechamientos del fuste de la pila, discontinuidades en la sección producto de errores constructivos, la calidad del concreto y el incremento/decremento de la longitud de la pila. En las figuras 6 a 8 se muestran los comportamientos de la onda en diferentes casos de discontinuidades en las pilas.

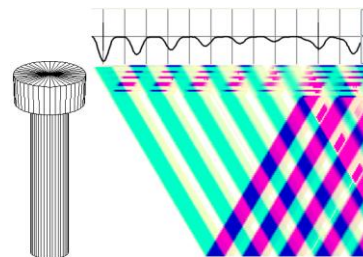


Figura 6. Reflexión de la onda y velocigrama en una disminución en la sección inferior de la pila.

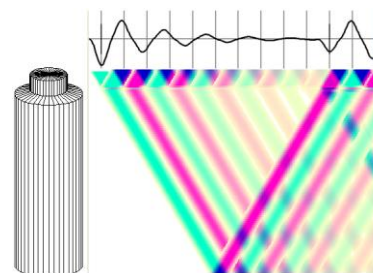


Figura 7. Reflexión de la onda y velocigrama en un aumento de la sección en la pila.

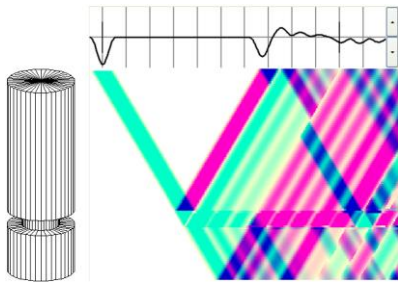


Figura 8. Reflexión de la onda y velocigrama en un estrechamiento de la sección inferior de la pila.



Figura 9. Contaminación del concreto de la pila



Figura 10. Discontinuidad de la sección de la pila.

En las figuras 9 y 10 se presentan ejemplos de las discontinuidades localizadas en pilas. Estas características generalmente sólo pueden observarse descubriendo el elemento una vez que se ha detectado una discontinuidad en el ensayo de integridad.

Como se mencionó, la prueba de integridad puede detectar, entre otras características de la pila, su longitud, aunque hay que tomar en cuenta que el método se limita a estudiar pilas cuya longitud no es mayor a 30 veces su diámetro. Esta regla empírica puede variar dependiendo las características del terreno que rodea a la pila, siendo menor si el contraste de rigidez entre el suelo y la pila es bajo.

Como ejemplo, se tienen pruebas realizadas en las pilas de una torre. A partir de los registros de campo, surgió la duda sobre la longitud y la integridad de las pilas, ya que se localizaba en una zona en la que factores naturales hicieron que la estructura de la torre colapsara extrayendo dos de las pilas y dejando otras dos en su sitio. Por tanto, se decide realizar una prueba de integridad a una de las pilas en buen estado y posteriormente extraer el elemento para verificar en campo los resultados. Cabe mencionar que en campo, en la mayoría de los casos las características de las pilas son difíciles de interpretar, debido a que pueden presentarse señales espurias o con mucho ruido que necesitan ser

filtradas mediante el software de interpretación de pruebas de integridad.

Al momento de realizar la prueba se obtuvieron los datos de las longitudes y las discontinuidades del elemento; sin embargo, el punto de mayor relevancia es que la longitud que se podía observar en el velocigrama obtenido, éste presentaba una longitud de la pila inferior a la longitud de proyecto, además daba cuenta de la inexistencia de campana en la pila de la pila.

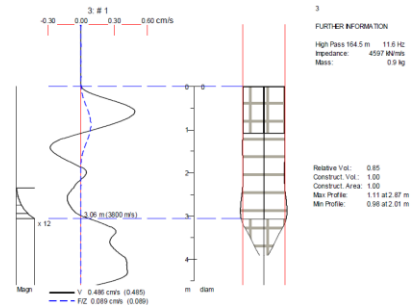


Fig. 11. Velocigrama obtenido de la interpretación de la prueba.

En la figura 11 se muestra el velocigrama obtenido de la prueba practicada a la pila de la torre, donde se observan dos tipos de discontinuidades: falta de la campana, y una importante disminución en la longitud de la pila. En la figura 12 observa la pila extraída comprobando su mala calidad y la disminución de la longitud del elemento que era aproximadamente de 3.1 m; se pudo deducir que las fallas fueron producto de errores constructivos y una mala elección del método de colado.

En la Tabla 2 se presentan diversos casos de resultados de pruebas de integridad, donde se observan una variedad de fallas localizadas en las pilas, y clasificadas cualitativamente en alguno de los cuatro grupos de interpretación: A-Pila Buena, B-Pila Mala, C-Pila con Posibles Defectos y D-Datos no Concluyentes.

6 COMENTARIOS FINALES

Se presentaron los lineamientos para la ejecución de pruebas de integridad en pilas de cimentación coladas *in situ*, su preparación, la ejecución y la interpretación de las pruebas de integridad. Además se describen los factores que influyen en la prueba y la clasificación cualitativa de la calidad de las pilas de acuerdo con cuatro familias: A, B, C y D.

Tabla 2. Velocigramas de pruebas de integridad con diversas clasificaciones.

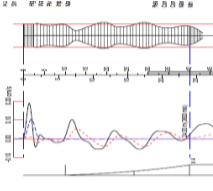
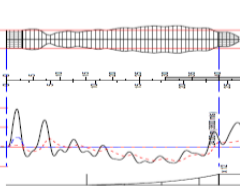
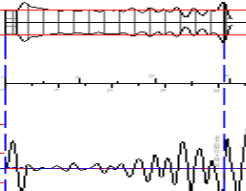
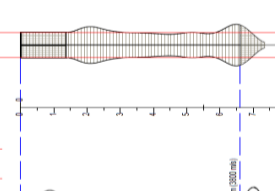
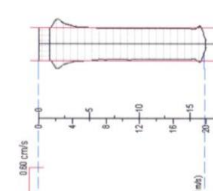
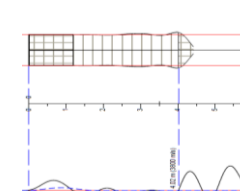
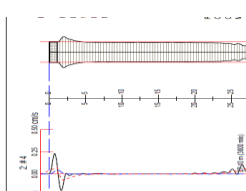
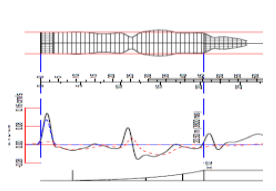
N°	Clasificación de tipo de pila	Velocigrama
5	<p>B-Pila Mala. Se observan posibles imperfecciones en el cabezal y a todo lo largo de la pila.</p>	
6	<p>B-Pila Mala. Se observan posibles imperfecciones en el cabezal y en la punta de la pila; además, reducciones y ampliaciones ligeras de la sección en distintas zonas a todo su largo. En la zona cercana a la punta, se presenta un posible incremento de la fricción lateral en la pila.</p>	
7	<p>B-Pila Mala. Se observa una calidad deficiente de concreto en el cabezal de la pila, así como una reducción general de diámetro a lo largo de la pila, y una reducción importante de diámetro a 17 m de profundidad.</p>	
8	<p>B-Pila Mala. Se observan decrementos de la sección a 5.5 m de profundidad aproximada y un incremento de sección en la punta de la pila asociada a la campana</p>	
1	<p>A-Pila Buena. No se observan irregularidades de importancia a lo largo de la pila, solamente reducciones ligeras de la sección en la punta.</p>	
2	<p>A-Pila Buena. Se observa un abultamiento o incremento de sección en la punta asociado a la campana de la pila</p>	
3	<p>A-Pila Buena. Se observan ampliaciones de la sección en el cabezal y reducciones cerca de la punta de la pila.</p>	
4	<p>A-Pilote Bueno. El pilote se forma por dos tramos unidos con las placas metálicas soldadas. A 10 m de profundidad se presenta un reflector generado por la placa de conexión de los elementos del pilote. Dado que para esta longitud del pilote puede observarse el reflector de la punta, se sugiere que la fricción lateral en el pilote es limitada.</p>	

Tabla 2. Velocigramas de pruebas de integridad con diversas clasificaciones (continuación).

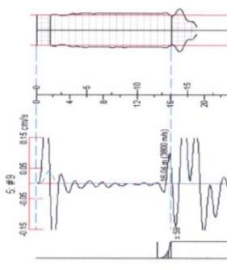
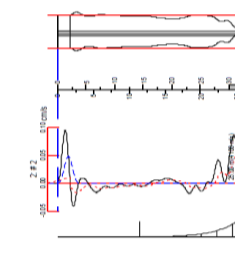
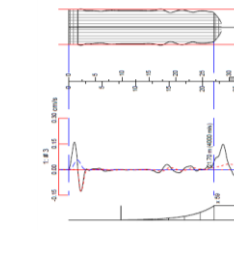
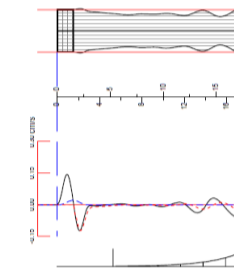
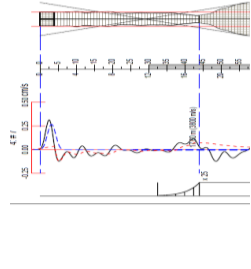
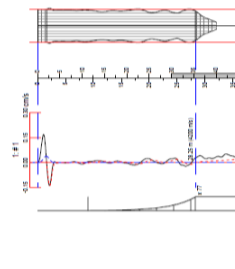
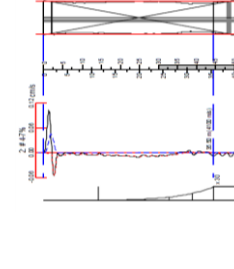
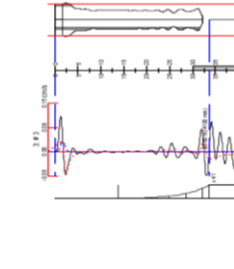
N°	Clasificación de tipo de pila	Velocigrama
9	<p>C-Pila con Posibles Defectos. Se observan irregularidades de importancia en la sección de la punta (probable azolve), así como reducción de la longitud de la pila (16.04m).</p>	
10	<p>C-Pila con Posibles Defectos. Se observa con dificultad el pulso reflector de la punta (L.pila=31 m); se presentan puntos intermedios en el velocigrama que pueden asociarse a anomalías o a oscilaciones del armado en el cabezal. Asimismo, se observa una posible reducción de la sección como a 16 m de profundidad aproximada.</p>	
11	<p>C-Pila con Posibles Defectos. Se observan claramente los pulsos de la cabeza y punta de la pila y se aprecia un pulso reflector intermedio aproximadamente a los 13 m de profundidad que provoca incrementos y decrementos de la sección de la pila.</p>	
12	<p>C-Pila con Posibles Defectos. No se observa claramente el pulso reflector de la punta, y se presentan oscilaciones en la parte intermedia a partir de los 10 m de profundidad, lo cual se correlaciona posiblemente con incrementos y decrementos de la sección de la pila, acortamiento de la pila o que al movimiento del armado que aflora en el cabezal.</p>	
13	<p>D-Datos no Concluyentes. El velocigrama muestra imperfecciones ubicadas cerca del cabezal que dificultan la interpretación de la pila por los múltiplos generado, por tal motivo no es posible la interpretación.</p>	
14	<p>D-Datos No Concluyentes. No se observa claramente el pulso reflector de la punta y se presentan pulsos intermedios y/o oscilaciones que pudieran estar asociados a las oscilaciones del armado que aflora en el cabezal o por ampliaciones y reducciones de la sección.</p>	
15	<p>D-Datos no Concluyentes. Dada la longitud de la pila (44.4 m) no se observa el pulso reflector de la punta. Asimismo, se presentan oscilaciones del velocigrama generados por la presencia del armado que aflora.</p>	
16	<p>D-Datos no Concluyentes. Se presentan pulsos intermedios antes del pulso reflector de la punta debido probablemente a vibraciones del armado o alguna imperfección en el cabezal.</p>	



Fig. 12, Extracción de la pila ensayada. Obsérvese la ausencia de concreto a los 1.5m de profundidad.

Se presenta un caso en el que se verifica el resultado de la prueba, dado que fue posible extraer la pila y observar algunos de los defectos producto del proceso constructivo. Se presentan diversos casos en los que se observan fallas localizadas en pilas.

Finalmente, se concluye que el equipo PIT es una herramienta eficiente para la verificar la calidad en la integridad de pilas de cimentación; además que es una opción viable en cuanto a costo y tiempos de ejecución se refiere. Es importante el uso de esta herramienta en el desarrollo de las cimentaciones profundas.

REFERENCIAS

Fleming K. *et al* (2009), *Piling Engineering*. CPI Antony Rowe, Great Britain. Third edition, 285.

Likins, G. *et al* (2007), *Defect analysis for CSL testing*, Geo-Denver 2007, *New Peaks in Geotechnics*, Denver, CO (CD-ROM).

ASTM (2005) *Standard Test Method for Low Strain Integrity Testing of Piles*.

PDI (2010) *Seminario sobre métodos dinámicos de ensayos y análisis de cimentaciones profundas*. Colegio de Ingenieros Civiles de México, México, D.F.

Rausche, F. *et al* (1992) *Pile integrity and analysis. Procedures of the Fourth International Conference on the Application of Stress Wave Measurements to Piles*, The Hague, Netherlands.