

# EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD DE CIMENTACIONES PROFUNDAS: ANÁLISIS Y VERIFICACIÓN *IN SITU*

## EVALUATION OF THE INTEGRITY OF DEEP FOUNDATIONS: ANALYSIS AND *IN SITU* VERIFICATION

CARLOS ANDRES GAVIRIA

*Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Ingeniería Eólica y Estructuras Inteligentes, G-7, Universidad del Valle, Cali*  
*carloaga@univalle.edu.co*

DANIEL GÓMEZ

*Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Ingeniería Eólica y Estructuras Inteligentes, G-7, Universidad del Valle, Cali*  
*dgomezp@univalle.edu.co*

PETER THOMSON

*Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Ingeniería Eólica y Estructuras Inteligentes, G-7, Universidad del Valle, Cali*  
*pethomso@univalle.edu.co*

Recibido para revisar julio 1 de 2008, aceptado septiembre 30 de 2008, versión final diciembre 10 de 2008

**RESUMEN:** Las cimentaciones profundas son usadas con el fin de brindar estabilidad a una variedad de estructuras tales como puentes, presas y edificaciones en condiciones donde las cimentaciones superficiales no la proporcionan. En consecuencia, ha surgido la necesidad de evaluar la calidad de este tipo de cimentaciones y descartar cualquier anomalía generada durante su proceso constructivo, motivo por el cual se han implementado los ensayos no destructivos, entre ellos la prueba de integridad de pilotes (PIT) que debido a sus bondades como lo son su rapidez y economía sumada a sus resultados, ha despertado el interés de los investigadores y constructores del medio. En el presente artículo se presentan aspectos generales de la prueba PIT y los resultados de su aplicación en once pilotes en una construcción cerca a la ciudad de Palmira, Colombia. Estos resultados fueron verificados mediante la excavación en dos pilotes en los que la PIT manifestó alguna anomalía, con lo cual se demostró la confiabilidad del método en la determinación de fallas en los elementos estructurales.

**PALABRAS CLAVE:** Prueba de integridad, PIT, Cimentaciones profundas, Pilotes.

**ABSTRACT:** Deep foundations are widely used for structures - bridges, dams, docks and buildings - located at sites with poor soil conditions at shallow depth. Due to the extensive use of deep foundations, the need has arisen for evaluating the structural integrity of these types of foundations posterior to their installation. A variety of non-destructive testing methods have been proposed and implemented for assessing the condition of deep foundations, but the PIT (pile integrity test) remains one of the more popular methods due to its relatively low cost and the short time involved in conducting such a test. This article describes some of the general aspects of the PIT and a specific application of this test on eleven piles at a construction site near the city of Palmira, Colombia. Structural problems were identified in two of the eleven piles and posterior excavations of these two piles proved the effectiveness of the PIT for assessing the structural integrity of deep foundations.

**KEYWORDS:** Integrity Test, PIT, Deep foundations, Piles.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las cimentaciones profundas son utilizadas para dar soporte a estructuras que debido a sus requerimientos (forma, carga vertical u horizontal) y/o a las características del terreno no pueden ser cimentadas a nivel de las mismas [1]. En la mayoría de los casos se utilizan para construir estructuras sobre suelos con capacidad portante baja que pueden presentar asentamientos excesivos o que tienen potencial de licuefacción.

Durante la construcción o el hincado de pilotes o caissons pueden ocurrir problemas tales como: fractura durante el clavado, derrumbes de las paredes laterales, inclusión de lodo en el concreto y cambios de la sección transversal [2]. Estos daños no son detectables por inspección visual luego de que el pilote ha sido hincado o fundido, por lo que el problema queda oculto.

Las metodologías para la evaluación de la integridad de los pilotes se pueden dividir en dos grandes grupos: ensayos destructivos y no destructivos. La prueba de integridad de pilotes (P.I.T.) se ha constituido como una de las pruebas no destructivas más utilizada en el mundo [3] debido a su rapidez, sencillez y confiabilidad, además de su bajo costo [4]. Con este ensayo se evalúa cualitativamente la integridad de los pilotes detectando grietas, cambios de la sección en el fuste y cambios de material que pueden comprometer el comportamiento estructural del elemento.

En este trabajo se presenta una metodología para la detección de daños, la cual fue implementada durante la construcción de los pilotes del edificio de la sede de la Universidad del Valle en Palmira, donde se presentaron anomalías en el vaciado del concreto causando desconfianza en los ingenieros encargados de la obra.

Se analizaron 12 pilotes con la metodología propuesta, encontrándose un presunto daño en dos de ellos. La interventoría de la obra, a cargo de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle, exigió verificar mediante una excavación, los pilotes que presumiblemente tenían problema.

Posterior a la excavación para la verificación del estado de los pilotes, se encontró que los problemas descritos por la prueba de integridad de pilotes PIT, estaban presentes de manera exacta, coincidiendo el tipo y la profundidad del daño, demostrando la efectividad de la prueba.

## 2. METODOLOGÍA DEL ENSAYO

La metodología de ensayo PIT se encuentra descrita de manera detallada en los artículos de Davis [5] y Niederleithinger et al. [6], en ellos se exponen los procesos de preparación, ejecución e interpretación de la prueba.

Actualmente la PIT se encuentra normalizada en diferentes países [7], desafortunadamente en Colombia no es una práctica común para la determinación de patologías en cimentaciones profundas, por lo que fue necesario utilizar la norma americana ASTM D 5882 [8], en la cual se señalan los requerimientos mínimos para llevar a cabo el ensayo, así como los procedimientos y aspectos técnicos a tener en cuenta.

### 2.1 Fundamento teórico del ensayo

La PIT se basa en el principio teórico de la propagación de ondas longitudinales de baja deformación que genera efectos de dilatación y compresión en el medio en que se propaga. La velocidad de propagación de la onda es directamente proporcional al módulo de elasticidad e inversamente proporcional a la densidad del material (1), esto se debe a que el módulo de elasticidad es proporcional a la fuerza restauradora, y la densidad a la inercia del sistema [4].

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

Donde  $c$  es la velocidad de propagación de la onda,  $\rho$  es la densidad del material y  $E$  es el módulo de elasticidad del material. Además, la velocidad de la onda es función directa de la impedancia  $Z$  [2, 7, 9], la cual es una medida

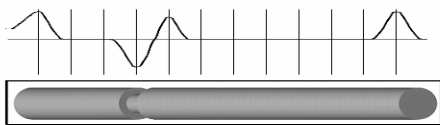
de la resistencia a la velocidad de propagación de la onda y se define como se muestra en (2).

$$Z = \frac{EA}{c} \quad (2)$$

Donde  $A$  es el área de la sección transversal del pilote.

Para realizar la prueba PIT se aplica un impacto en la cabeza del pilote con un pequeño martillo, generando una onda que se propaga a través del fuste hasta la punta y retorna nuevamente hasta la cabeza del mismo. La vibración causada por la onda es captada a través de un acelerómetro previamente colocado en la parte superior del pilote y conducida a un acondicionador, posteriormente es transformada en pulsos eléctricos a una señal digital por medio de una tarjeta de adquisición y finalmente es analizada en un computador con ayuda de un software de procesamiento.

Al presentarse cualquier variación en las características del pilote (cambios en la sección transversal, discontinuidad del elemento, porosidad o mezcla de tierra con el concreto), se producen cambios en la impedancia generando una reflexión temprana de la onda, la cual es analizada para predecir la ubicación y el tipo de patología en el pilote (figura 1).



**Figura 1.** Reflejo del pulso debido a una disminución de la sección transversal en el fuste

**Figure 1.** Reflection of a pulse due to a reduction in the cross sectional area

Una vez se procesan un conjunto de señales de un mismo elemento se obtienen varios gráficos de velocidad en función del tiempo. Conocida la longitud del elemento y la velocidad de propagación, se procede a realizar la valoración cualitativa de la integridad, observando las variaciones que experimenta la señal, determinando la profundidad de la anomalía y cuantificando la gravedad del daño a través del Método Beta [10].

Para cuantificar la variación en la impedancia, Rausche et al. en [10] implementaron el Método Beta ( $\beta$ ), para determinar el cambio relativo de la impedancia en el pilote usando las reflexiones registradas mediante la prueba y de esta manera obtener el porcentaje de reducción de impedancia, que es directamente proporcional a la variación de la sección transversal del elemento.

Para el cálculo del valor  $\beta$  es necesario determinar el valor de  $\alpha$ , el cual está definido por (3).

$$\alpha = \frac{V_{daño}}{V_{impacto}} \quad (3)$$

Donde  $\alpha$  es la relación entre la velocidad registrada en la prueba para la reflexión de daño identificado –onda reflejada– ( $V_{daño}$ ), y la velocidad de la onda registrada por la prueba para el pulso de entrada ( $V_{impacto}$ ). El porcentaje de daño  $\beta$  es calculado con (4).

$$\beta = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \quad (4)$$

Según el valor del parámetro  $\beta$ , se estima el daño en la sección transversal del pilote mediante la tabla 1.

**Tabla 1.** Guía de valoración de daño con el parámetro BETA,  $\beta$

**Table 1.** Correlation of damage to Beta,  $\beta$

Valor de Beta, ( $\beta$ )	Estado del fuste
100	Uniforme
80 - 100	Daño despreciable
60 - 80	Daño significativo
<60	Pilote roto

El Método Beta presenta dos grandes limitaciones en la estimación del daño en el pilote. No tiene en cuenta los efectos de la resistencia del suelo y además, sólo son detectables los cambios en la sección transversal con longitudes mayores a la longitud del pulso, lo cual restringe la técnica al no predecir daños severos debido a cambios pequeños en la impedancia.

## 2.2 Procesamiento de la señal

Para el tratamiento de las señales se desarrolló un algoritmo que consta de los siguientes pasos:

- 1) Selección del rango de datos a analizar para su posterior procesamiento.
- 2) Filtrado de la señal; a través del cual se remueve el ruido y aquellas reflexiones producidas por la fricción del pilote con el suelo.
- 3) Integración de la señal de aceleración para obtener velocidad; en este proceso se obtiene la señal de velocidad de la onda a lo largo del pilote.
- 4) Amplificación de la señal; con este método se contrarresta la pérdida de energía causada por el viaje de la onda en el pilote permitiendo la visualización clara de los reflejos de la onda.

Las señales fueron filtradas con una banda inferior de 400 Hz y una banda superior de 1500 Hz, y posteriormente integradas numéricamente para obtener a partir del registro de aceleración el registro de velocidad.

La amplificación se realizó usando una función de tipo exponencial la cual es recomendada por la norma ASTM D 5882 [8], de acuerdo con la expresión:

$$f_A = e^{\ln(A) \frac{L(x)}{l}} \quad (5)$$

Donde  $f_A$  es la función de amplificación,  $A$  es una constante de amplificación con valor superior a 1,  $l$  es la longitud del pilote y  $L(x)$  es el vector de posición a lo largo del pilote.

En la presente investigación se utilizó la función de amplificación mostrada en la ecuación 5 y el valor de la constante  $A$  se determinó experimentalmente con un conjunto de ensayos realizados en el pilote guía, como se explica más adelante.

El algoritmo se programó en el paquete matemático MATLAB [11]. Este programa realiza la integración numérica de la señal de aceleración para obtener el registro de velocidad,

además, emplea la función de amplificación para permitir visualizar mejor la señal.

## 2.3 Características del subsuelo

El área del lote donde se realizó el ensayo hace parte del Cono Aluvial del Río Palmira y es el resultado de un proceso acumulativo de materiales provenientes de la depositación gradual del Río Palmira. La estratigrafía resultante refleja una acumulación de materiales que se han clasificado naturalmente, quedando los finos en la parte superior y los más gruesos al fondo. Este cono aluvial fue cortado por corrientes menores que formaron su propio cauce y su propio depósito de sedimentos. Luego, esos pequeños cauces se unen hasta formar un cauce principal, siendo esto lo que se conoce actualmente.

La Universidad del Valle sede Palmira consiste en 28 edificios de tres pisos separados por juntas que conforman un área aproximada de 18000 m<sup>2</sup>.

El lote donde se realizaron las Pruebas de Integridad en los pilotes, presenta la estratigrafía de cuatro capas, la primera de ellas con un espesor de 2.6 metros compuesta de un relleno heterogéneo blanco. La capa inferior, entre los 2.6 y 6.0 metros, presenta un suelo residual compuesto por limos arenosos y arenas limosas de muy baja plasticidad. La capa siguiente llega hasta los 14.3 metros y está compuesta por arenas de densidad relativa muy alta con índices de plasticidad entre 0 y 10%. Por último se tiene una capa que se extiende a los 30 metros compuesta de arenas muy densas.

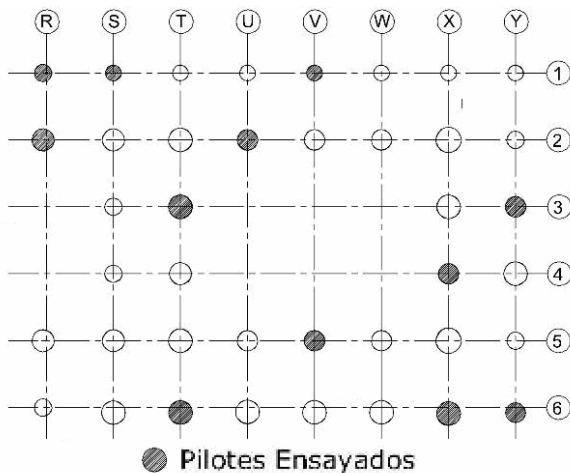
Debido a que el suelo presentó un elevado índice de potencial de licuefacción, se optó por una cimentación compuesta de pilotes circulares de fuste recto preexcavados, empleando lodo bentónico durante la fundición, la cual se realizó con concreto fluido tipo "Tremie".

Estos pilotes presentan diámetros entre los 1.1 y 1.5 metros y profundidades entre los 13.65 y 16.60 metros.

### 2.4 Descripción del ensayo

En la primera fase del proyecto se fundieron 40 pilotes, presentándose inconvenientes en 11 de ellos, tales como: menor consumo de concreto que el calculado, levantamiento del castillo de refuerzo y discontinuidad durante la fundición del elemento. De acuerdo con lo anterior se optó por realizar la prueba de integridad en los 11 pilotes dudosos para tener algún conocimiento sobre el estado estructural, ya que se desconocía el tipo de anomalía que podrían presentar.

De esta manera se ejecutaron pruebas en los 11 pilotes, como se muestra en la figura 2. Con el objeto de tener un pilote como parámetro de referencia, se realizó una prueba adicional en el pilote 3T que, por las características que presentó en el vaciado y en el tiempo de fundición, se consideró como el de referencia para determinar la velocidad de propagación.



**Figura 2.** Planta con la ubicación de los pilotes ensayados referenciados según los ejes alfabéticos y numéricos

**Figure 2.** Layout and numbering of the piles

A los pilotes se les realizó la prueba PIT cumpliendo los requerimientos de la norma ASTM D 5882 [8, 10, 12, 13], para lo cual fueron evaluados después de siete días de fundidos, tomando en tres puntos diferentes, diez registros sobre la cabeza del elemento, para un total de 30 registros por elemento.

Los ensayos fueron realizados con el equipo portátil para medición de vibraciones de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la

Universidad del Valle. El equipo está compuesto de un acelerómetro calibrado de alta frecuencia, un martillo con un acelerómetro acoplado y un sistema de adquisición compuesto de acondicionadores, caja de conexiones, tarjeta de adquisición y un computador portátil (figura 3).



**Figura 3.** Equipo PIT  
**Figure 3.** PIT equipment

Para realizar el ensayo se utilizó un martillo de 0,908 kilogramos (2 libras), seleccionado como un promedio del peso recomendado en la literatura [3, 10, 13, 14]. Este generó una onda con energía suficiente para recorrer toda la longitud del pilote y ser detectada por el acelerómetro.



**Figura 4.** Superficie preparada para la prueba PIT  
**Figure 4.** Pile surface prepared for the PIT

Los ensayos se realizaron colocando un acelerómetro de sensibilidad uniaxial paralelo al eje del pilote de concreto (una vez la superficie estaba limpia y pulida) y se generó la onda impactando de manera perpendicular a

la superficie como se observa en las figuras 4 y 5.

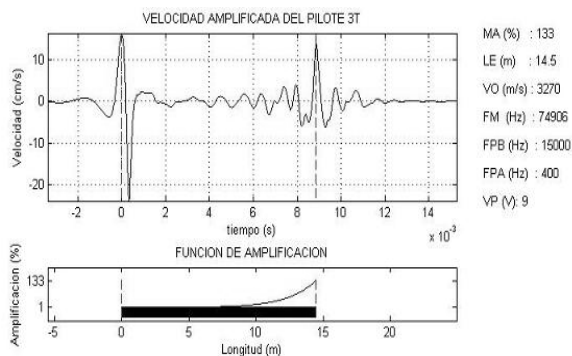


**Figura 5.** Impacto con el martillo sobre la superficie  
**Figure 5.** Hammer impact on the pile surface

### 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se realizaron 11 pruebas de integridad en los pilotes que presumiblemente tienen patologías y una prueba adicional en un pilote que se considera en buen estado para calibrar el software desarrollado.

La señal encontrada y procesada en el pilote guía se muestra en la figura 6, sobre la cual se observa el rebote de la onda en la punta del caisson a los  $8.87 \times 10^{-3}$  segundos.



**Figura 6.** Registro de Velocidad del pilote guía (3T)  
**Figure 6.** Velocity profile for the reference pile (3T)

De acuerdo con la metodología de ensayo de la ASTM D 5882 [8], para determinar la velocidad de propagación de la onda se hizo coincidir el reflejo de la punta con la longitud del pilote (esto se logra variando la velocidad) en un ensayo

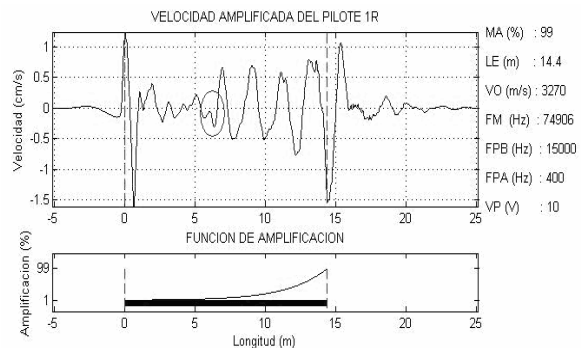
preliminar sobre el pilote guía, obteniendo la velocidad de propagación en el pilote de 3270 m/s.

Una vez determinada la velocidad de onda en campo se realizó la prueba en los 11 pilotes restantes. Obtenidos los registros se procesaron con ayuda del programa para su posterior análisis.

El análisis consistió en determinar la existencia de rebotes anteriores al de punta y una vez localizados se calculó la pérdida de impedancia usando el Método Beta [10]. A continuación se describe el análisis para cada pilote (la nomenclatura está basada en el eje alfabético y numérico correspondiente a cada pilote).

#### 3.1 Pilote 1R

Para este pilote se obtuvo el registro de velocidad mostrado en la figura 7. En él se observa un reflejo de signo contrario al pulso de impacto (reflejo negativo), lo cual indica un ensanchamiento de la sección transversal del elemento a los 6 metros de profundidad, aproximadamente. De acuerdo con lo anterior, se considera que el pilote está en buen estado, con una longitud total entre los 14.5 y 15.2 metros definida por el reflejo de la punta.



**Figura 7.** Registro de velocidad pilote 1R  
**Figure 7.** Velocity profile for pile 1R

#### 3.2 Pilote 1S

En este elemento no se presentó ningún tipo de reflejo anticipado en el registro de velocidad (figura 8), por lo cual se considera que está en buen estado. El tiempo que duró el viaje de la

onda indica que el pilote tiene una longitud aproximada de 14.4 metros, lo cual coincide con el volumen de concreto colocado en el momento de la fundición.

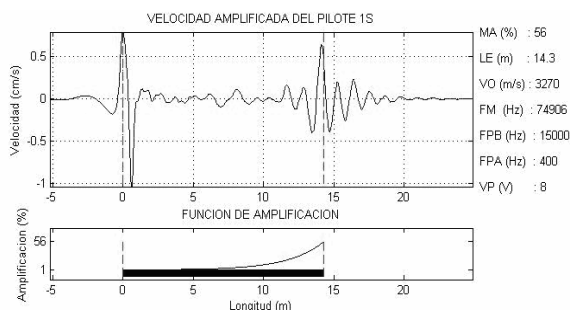


Figura 8. Registro de velocidad pilote 1S  
Figure 8. Velocity profile for pile 1S

### 3.3 Pilote 1V

En el registro de velocidad de este pilote (figura 9) se observa una anomalía, evidenciada en el reflejo temprano de la onda a una profundidad de 3 metros. Este reflejo se interpretó como un daño de categoría considerable por presentar una reducción de la impedancia en un 45%. Adicionalmente el reflejo de punta no es claro por lo cual no se puede determinar la longitud total de este elemento.

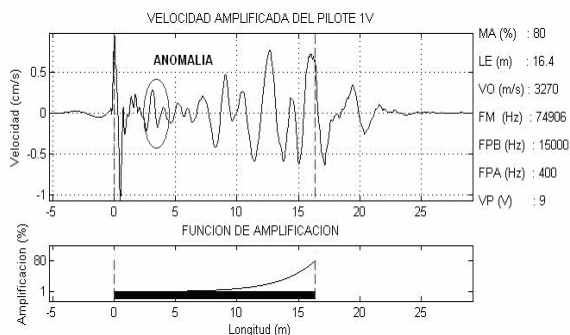


Figura 9. Registro de velocidad pilote 1V  
Figure 9. Velocity profile for pile 1V

### 3.4 Pilote 2R

La longitud de este pilote se encuentra entre los 15 y 16 metros, según el registro mostrado en la figura 10. El reflejo tiene signo negativo y se presenta a 3.5 metros de la cabeza del elemento. El rebote tiene signo contrario al valor pico del impacto aplicado, lo que indica un aumento en la sección transversal del pilote, patología que no

afecta la capacidad estructural del elemento. Por lo tanto, se estima que este pilote no presenta defectos significativos a lo largo del fuste.

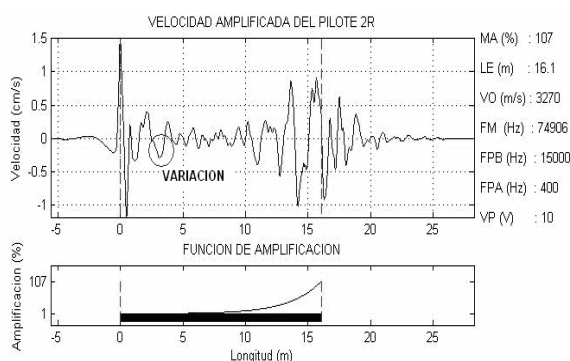


Figura 10. Registro de velocidad pilote 2R  
Figure 10. Velocity profile for pile 2R

### 3.5 Pilote 2U

La prueba de integridad sobre este pilote (figura 11) manifestó un reflejo representativo a 2.5 metros de la cabeza del elemento, exactamente donde se estima que se formó una junta fría según la cantidad de concreto vaciado en el momento de la fundición, lo cual muestra que el método desarrollado es capaz de detectar esta clase de anomalías. En el registro se puede apreciar un aumento de la impedancia a 11 metros de profundidad debido al aumento de la sección transversal, lo cual no afecta la capacidad estructural del elemento y por tanto se considera que el pilote está en buen estado.

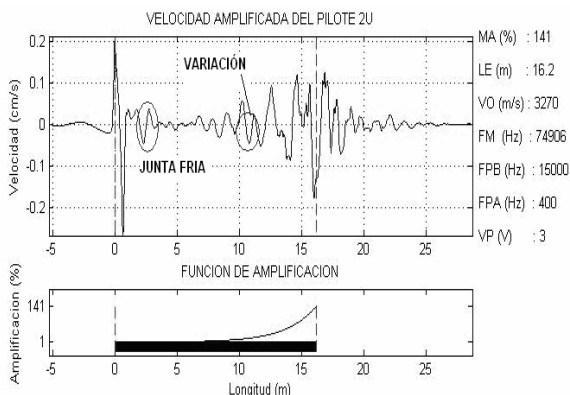
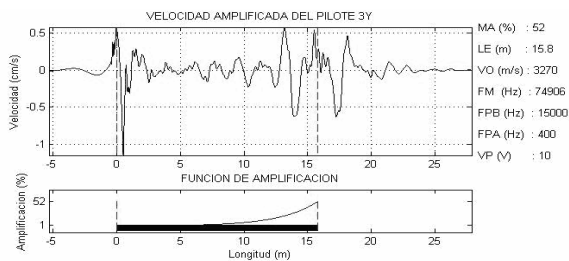


Figura 11. Registro de velocidad pilote 2U  
Figure 11. Velocity profile for pile 2U

### 3.6 Pilote 3Y

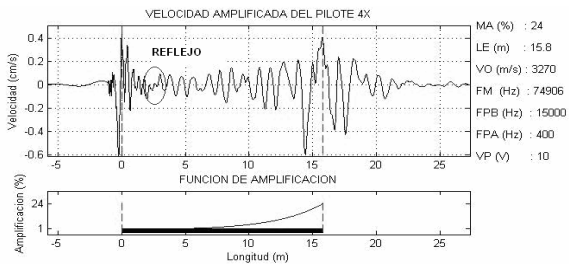
En este pilote (figura 12) se observó un reflejo representativo a 2.3 metros, exactamente donde se estima que se formó una junta fría según la cantidad de concreto vaciado en el momento de la fundición. Además, se presentó otro reflejo a los 5.5 metros de la cabeza del elemento con igual signo al valor pico del impacto aplicado, lo que indica una disminución de la impedancia. Este reflejo fue evaluado usando el método Beta, encontrando una reducción de la impedancia del 80% lo cual clasifica al pilote como en buen estado, y se puede despreciar la disminución de la sección transversal. Del reflejo de la punta se determinó que la longitud del pilote es de 13.5 metros.



**Figura 12.** Registro de velocidad pilote 3Y  
**Figure 12.** Velocity profile for pile 3Y

### 3.7 Pilote 4X

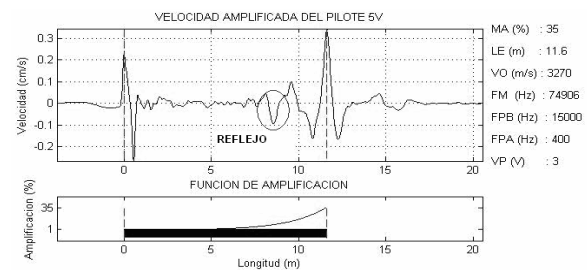
La longitud de este pilote se estima en 14.5 metros según el registro mostrado en la figura 13. El reflejo tiene signo contrario al valor pico del impacto aplicado y se presenta a 2.5 metros de la cabeza del elemento, esto indica un aumento en la sección transversal del pilote, patología que no afecta la capacidad estructural del elemento. Por lo tanto, se estima que este pilote no presenta defectos significativos a lo largo del fuste.



**Figura 13.** Registro de velocidad pilote 4X  
**Figure 13.** Velocity profile for pile 4X

### 3.8 Pilote 5V

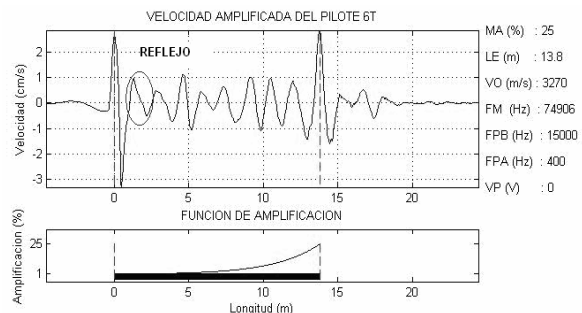
La longitud de este pilote se estima en 11.4 metros, según el registro mostrado en la figura 14. El reflejo tiene signo negativo y se presenta a 8.5 metros de la cabeza del elemento. El rebote tiene signo contrario al valor pico del impacto aplicado, lo que indica un aumento en la sección transversal del pilote, patología que no afecta la capacidad estructural del elemento. Por lo tanto, se estima que este pilote no presenta defectos significativos a lo largo del fuste.



**Figura 14.** Registro de velocidad pilote 5V  
**Figure 14.** Velocity profile for pile 5V

### 3.9 Pilote 6T

La prueba de integridad sobre este pilote (figura 15) mostró un reflejo representativo a 2 metros de la cabeza del elemento, exactamente donde se estima que se formó una junta fría según la cantidad de concreto vaciado en el momento de la fundición. Este pilote tiene una longitud de 13.8 metros aproximadamente según el análisis del rebote de la onda en la punta. De acuerdo con la señal obtenida del ensayo de este pilote se califica como un elemento sin daños.

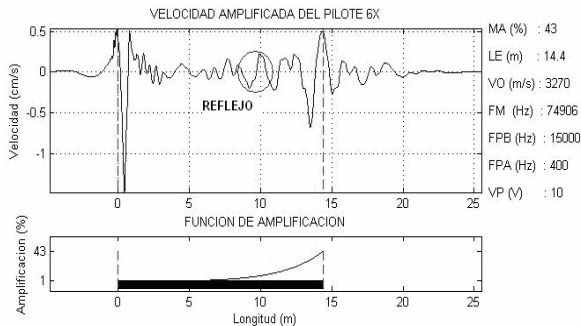


**Figura 15.** Registro de velocidad pilote 6T.  
**Figure 15.** Velocity profile for pile 6T.



### 3.10 Pilote 6X

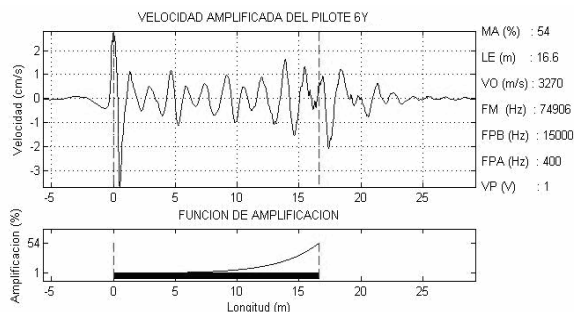
Para el pilote 6X se encontró un rebote a una profundidad de 9 metros (figura 16), el cual tiene un signo contrario al impacto aplicado y por tanto se asocia con un ensanchamiento del fuste, esta condición no afecta la capacidad estructural del elemento y se considera como un elemento íntegro. Este pilote tiene una longitud de 14.4 metros aproximadamente según el análisis del rebote de la onda en la punta.



**Figura 16.** Registro de velocidad pilote 6X  
**Figure 16.** Velocity profile for pile 6X

### 3.11 Pilote 6Y

En el registro de velocidad del pilote 6Y (figura 17) se observó una serie de rebotes tempranos a partir de los 0.3 metros de la cabeza del pilote y no se logró apreciar un reflejo claro de la punta, por lo cual la prueba de integridad se clasifica como no concluyente. Este tipo de registro indica que después del primer rebote no se tiene información determinante sobre el estado del elemento por lo que se recomendó excavar hasta los 4.5 metros de profundidad para verificar el estado estructural del elemento.



**Figura 17.** Registro de velocidad pilote 6Y  
**Figure 17.** Velocity profile for pile 6Y

## 4. RESUMEN DE LOS RESULTADOS

Con el análisis del pilote guía (3T) se calibró el equipo para analizar los otros once pilotes. El resumen del análisis de todos los pilotes se muestra en la tabla 2. Los pilotes defectuosos fueron el 1V y el 6Y, para los cuales se sugirió que fueran inspeccionados de manera visual. El resumen de resultados se muestra en la tabla 2.

**Tabla 2.** Resultados Prueba de Integridad  
**Table 2.** Results of the Integrity Test

PILOTE	L [m]	Pda [m]	% RdZ
3T	14,40	No hay	No hay
1R	14,50	No hay	No hay
1S	14,30	No hay	No hay
1V	15,90	3	45
2R	15,60	No hay	No hay
2U	16,20	No hay	No hay
3T	14,40	No hay	No hay
4X	14,50	No hay	No hay
5V	12,10	No hay	No hay
6T	13,80	No hay	No hay
6X	14,40	No hay	No hay
6Y	14,10	No claro	No claro

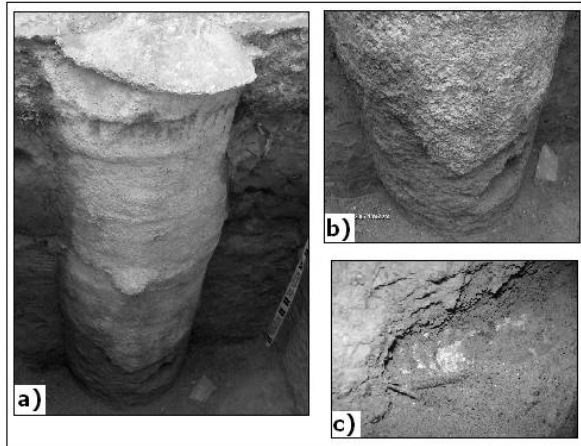
Donde  $L$  es la longitud del pilote,  $Pda$  es la profundidad de daño y  $RdZ$  es el porcentaje al que queda reducida la impedancia en el sitio de la anomalía.

Debido a la existencia de un pilote con problemas de integridad estructural (pilote 1V) y otro con resultados no concluyentes (pilote 6Y) se optó por realizar una exploración a cielo abierto de estos dos elementos, la cual se describe en el siguiente apartado.

## 5. RESULTADOS DE LA EXPLORACIÓN

En el pilote designado como 1V se detectó una reducción de la impedancia en el análisis de la PIT, por lo que se realizó una excavación hasta una profundidad de 3.5 metros sobre el lado exterior de la estructura, encontrando un elemento continuo (figura 18.a), adicionalmente se localizó un cambio en la calidad del concreto a partir de los 2.5 metros

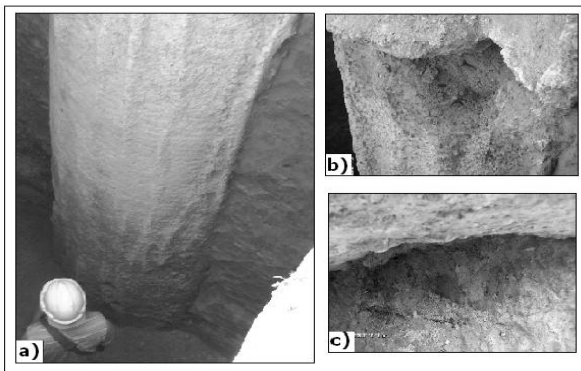
(figura 18.b) donde el material hallado presenta contaminación por inclusión de lodo y una baja resistencia, resultado de un apique. Lo anterior corresponde a la pérdida de impedancia que se traduce en una disminución del módulo de elasticidad revelado en la PIT.



**Figura 18.** Fotos exploración pilote 1V, a) Longitudinal, b) Detalle cambio de sección, c) Detalle apique

**Figure 18.** Images of the excavation of pile 1V, a) Longitudinal, b) Detail of variation in cross sectional area, c) Detail of reduced area

Se realizó una exploración hasta alcanzar una profundidad de 4.5 metros sobre el pilote designado como 6Y, encontrando de manera similar al caso anterior, un pilote de sección uniforme y continua (figura 19.a).



**Figura 19.** Fotos exploración pilote 6Y, a) Longitudinal, b) Detalle cabeza, c) Detalle concreto contaminado

**Figure 19.** Images of the excavation of pile 6Y, a) Longitudinal, b) Detail of the head, c) Detail of the contaminated concrete

Adicionalmente, el elemento presentó inclusiones de lodo y contaminación del concreto en los primeros 0.3 metros (cabeza del pilote). Lo anterior es acorde con los resultados de la PIT, una vez producido el impacto sobre el elemento, la onda se reflejó a una profundidad de 0.3 m. y por tanto generó un conjunto de reflejos tempranos que explican el comportamiento de la señal y que impidieron la verificación de la integridad del mismo con esta prueba.

## 6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Para analizar la integridad de pilotes pre-excavados, se debe tener en cuenta los problemas encontrados durante su excavación y vaciado, ya que los ensanchamientos de la sección, juntas frías, entre otras patologías constructivas causan rebotes tempranos de la onda que deben ser descartados durante el análisis de las señales para una buena interpretación de la prueba.

Como se observó en los resultados de la exploración, los cambios de calidad del concreto son revelados por la prueba PIT (cambios de impedancia), lo que demuestra la viabilidad para la evaluación de la integridad estructural en pilotes pre-excavados e hincados. Igualmente se concluye que este método es aplicable para pilotes colocados sobre depósitos de suelos similares a los del sector de La Carbonera en la ciudad de Palmira.

Para obtener buenos resultados de la prueba PIT sobre pilotes pre-excavados se debe realizar un correcto descabece del elemento, removiendo la totalidad del material contaminado de lodo bentónico.

Se espera a futuro realizar investigaciones encaminadas a estudiar el proceso de disipación de energía de onda en los pilotes y de esta manera determinar la función y constantes de amplificación más adecuadas a las características particulares de la obra en estudio.

De igual manera se plantea realizar la prueba de integridad en otras obras a fin de caracterizar los parámetros de análisis de una manera experimental bajo diferentes composiciones de suelo y tipología de pilotes.

## REFERENCIAS

- [1] DAS, B., Principios de ingeniería de cimentaciones, Universidad de Michigan, Michigan, 2001.
- [2] VIECO, B., SALVÁ, P. Aseguramiento de calidad en fundaciones profundas: ensayo de integridad de pilote. Memorias del VII Congreso Colombiano de Geotecnia. Bogotá, 21-23 , Octubre 1998.
- [3] FERNÁNDEZ, B., TELLEZ, E., Los ensayos de integridad estructural de pilotes. Situación actual en España y perspectivas. Disponible:  
<http://www.fernandeztadeo.com/doc002.htm>  
[Citado en Septiembre 12, 2007].
- [4] VALINHO, R., CUNHA, P. Avaliação da integridade de estacas cravadas assentes em argila mole da cidade de Campos dos Goytacazes. Memória de II Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos (Geojovem). Nova Friburgo, 6-12, novembro 2006.
- [5] DAVIS, A., The nondestructive impulse response test in North America: 1985–2001, NDT & E International, Volume 36, Issue 4, 185-193, 2003.
- [6] NIEDERLEITHINGER, E., TAFFE, T., Early stage elastic wave velocity of concrete piles, Cement and Concrete Composites, Volume 28, Issue 4, 185-193, 2006.
- [7] RESTREPO V. Implementación de una solución analítica para el fenómeno de propagación unidimensional de ondas en pilotes y su adaptación para la interpretación de resultados de la prueba de integridad de pilotes (PIT) [Trabajo de grado]. Bogotá, Universidad Javeriana, 2005.
- [8] ASTM. Standard test method for low strain integrity testing of piles D-5882-00. American Society for Testing and Materials, 2000.
- [9] LIKINS, G., RAUSCHE, F. Recent Advances and proper use of PDI low strain pile integrity testing. Memories Sixth International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles. São Paulo, Brazil, 211-218, September 2000.
- [10] RAUSCHE, F., LIKINS, G., RENKUNG, S. Pile integrity testing and analysis. Memories Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. The Netherlands, 613-617, September 1992.
- [11] MATH WORKS Inc. MATrix LABoratory MATLAB version 7.1. High-performance language for technical computing. August 2007.
- [12] SHU-TAO, T., JIAN-HUA, C., CHENG-HAO, W., Numerical simulation and experimental study of parallel seismic test for piles, International Journal of Solids and Structures, Volume 43, Issues 7-8, 2279-2298, 2006.
- [13] SHENG-HUOO, N., LUTZ, L., JENQ-JY, C., KUO-FENG, L., Low-strain integrity testing of drilled piles with high slenderness ratio, Computers and Geotechnics, Volume 33, Issues 6-7, 283-293, 2006.
- [14] MORGANO, C. Determining embedment depths of deep foundations using non-destructive methods. Memories Fifth International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles (STRESSWAVE '96). Orlando Florida, 734-747, September 1996.