

ALCONPAT/08

III Congreso Uruguayo y II Congreso Regional de
GESTIÓN DE LA CALIDAD, PATOLOGÍA y RECUPERACIÓN de la CONSTRUCCIÓN
3 al 5 de diciembre de 2008 / LATU / Auditorio y Hall / Montevideo - Uruguay

UTILIZACIÓN DE ENSAYOS DINÁMICOS DE CARGA EN EL CONTROL DE RECEPCIÓN DE PILOTES EN EL PUERTO DE MONTEVIDEO

Alvaro Gutiérrez¹, Leonardo Abreu¹, Christian Hoffmann¹, Daniel Hasard¹

RESUMEN

El Laboratorio de Control de Calidad de Fundaciones (LCCF) del Instituto de Estructuras y Transporte de Facultad de Ingeniería realizó el asesoramiento en el control de recepción de fundaciones de la obra de prolongación del Colector Colombia, en el Puerto de Montevideo. La fundación de dicha obra consiste en 400 pilotes del tipo “hinca de tubo”, construidos de 0.30 m de diámetro nominal y aproximadamente 8 m de longitud.

Para el control de recepción de los pilotes, el LCCF realizó 400 ensayos sónicos de integridad, dos ensayos estáticos de carga y cuatro ensayos dinámicos de carga a compresión. De esta forma se incorporan por vez primera, los ensayos dinámicos de carga a los controles habituales de pilotajes, realizados hasta el momento en el país en base a ensayos de integridad, control de calidad de materiales, y ensayos estáticos de carga.

El programa de interpretación de los ensayos dinámicos, mediante un modelo dinámico elasto-plástico de interacción suelo-pilote, considera como caso particular el comportamiento estático carga-deformación del pilote ensayado.

Al realizar los ensayos estáticos en dos de los pilotes ensayados previamente con el ensayo dinámico, fue posible comparar los gráficos carga-deformación de la simulación del comportamiento estático obtenida del ensayo dinámico y los obtenidos en los ensayos estáticos. Ambos gráficos resultaron muy consistentes en relación a valores de carga y desplazamientos máximos.

El trabajo presenta una breve descripción de la metodología empleada en los ensayos dinámicos, analiza los resultados obtenidos en ambos tipos de ensayo, y presenta una propuesta crítica de cómo incorporar este tipo de ensayo rápido, efectivo y de bajo costo en el control de pilotajes.

Palabras Clave: Construcción, Fundaciones, Control de Calidad, Ensayos de Pilotes, Ensayos Dinámicos de Carga

¹ Laboratorio de Control de Calidad de Fundaciones, Instituto de Estructuras y Transporte “Prof. Julio Ricaldoni”, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.

ABSTRACT

The Laboratory of Foundations Quality Control (LCCF) of the Structural and Transport Institute of the Engineering Faculty, as a consultant, made the quality control works for the foundation reception at the Colector Colombia prolongation, sited at the Montevideo Harbor. The foundations involved were 400 Franki piles, builded with 0.30 m of nominal diameter and about 8 m length. 400 sonic integrity tests, two static load tests and four dynamic load tests were done. In this way, the dynamic load tests are incorporated for the first time to the common pile supervision controls, done in our country until now, based on the sonic integrity pile testing, material quality controls and static load tests.

The software used for the dynamic test interpretation, is based on an elasto-plastic interaction soil-pile model, and considers the static charge-displacement behavior of the pile tested as a particular case.

In order to compare the charge-displacement behaviour of both static and dynamic tests, static load tests were done on two of the piles that were previously tested with the dynamic load test. The results showed that the maximum load and displacement values were consistent in both graphics obtained.

This work presents a brief description of the methodology used on the dynamic tests, analyses the obtained results in both types of test, and presents a critical proposal about how to incorporate this kind of quick, effective and low cost test on the pile control.

Key Words: Construction, Foundations, Quality Control, Pile Tests, Dynamic Load Tests

INTRODUCCIÓN

El control de calidad de fundaciones por pilotes, en obras donde la fundación tiene relevancia, ya sea por la cantidad de pilotes a ejecutar, su complejidad, o simplemente el costo de los mismos, debería realizarse en tres etapas: Calibración del diseño, Control de producción y ejecución, Control de recepción.

Partiendo de la información del estudio de suelos, de cargas de servicio permanentes y accidentales, así como su distribución en planta, se procede al diseño del tipo de fundación a emplear. En el caso de optarse por pilotes, se definen diámetros y longitudes de proyecto, cantidad y localización de los mismos.

Para la calibración del diseño, es recomendable construir algunos pilotes de prueba para ensayar. Si se justifica, se pueden variar diámetros y longitudes para luego proceder al rediseño en función de los resultados obtenidos. Este procedimiento significa una inversión a comienzos de obra que si bien puede resultar poco atractiva, finalmente puede desembocar en generar ahorros significativos. Por otra parte, hasta el momento, la única herramienta disponible en el país para calibrar el diseño era el ensayo estático de carga, que requiere de la construcción de un dispositivo especial y de por lo menos una semana entre construcción del dispositivo, ensayo e interpretación.

Durante la etapa de producción, además del control de materiales, la herramienta esencial de control de calidad es sin dudas el ensayo de integridad de pilotes. Sin necesidad de una preparación elaborada del pilote, rápido de realizar, y generalmente rápido de interpretar, no altera el ritmo de obra cuando se logra una buena coordinación entre empresa constructora y laboratorio de control. Se controlan en lo posible todos los pilotes confirmando su integridad. En muchos casos no se realiza el control de recepción siendo el control de producción el último realizado; esto puede provocar la confusión de ambos controles.

El control de recepción se realiza generalmente antes de terminar la ejecución del pilotaje y se completa el diagnóstico con ensayos de carga realizados en pilotes que tuvieron alguna dificultad de ejecución o que se encuentran en una zona particular de la obra con un perfil de suelos menos resistente que en el resto. Se controla así, en cierta manera por defecto, que los pilotes alcancen la resistencia mínima necesaria de diseño.

Los ensayos de carga son una buena herramienta para determinar la carga de trabajo de un pilote o un grupo de pilotes, ya sea determinando su carga de rotura o bien determinando una carga admisible, en el gráfico carga-deformación, a partir de un asentamiento máximo admisible generalmente definido por la estructura que descarga en los pilotes.

El tipo de ensayo depende del tipo de solicitaciones predominantes en la estructura:

- cargas permanentes predominantes - ensayos estáticos lentos
- cargas accidentales predominantes - ensayos estáticos rápidos

El ensayo de carga estático lento dura aproximadamente 24 horas, requiere de la construcción de un dispositivo para la reacción e implica que durante su realización se detenga la obra en la zona cercana al pilote a ensayar. Desde hace algunos años internacionalmente se ha propuesto una nueva alternativa: el ensayo de carga dinámico. Su tiempo de ejecución es muy rápido, no requiere de dispositivos adicionales ni significa la detención de la obra.

El Laboratorio de Control de Calidad de Fundaciones (LCCF) de la Facultad de Ingeniería adquirió recientemente un equipo para realizar este tipo de ensayos. Para la correcta implementación de su uso, se realizó una prueba estática y una dinámica sobre un mismo pilote, para cotejar los resultados y así poder extraer conclusiones sobre el grado de confiabilidad de este nuevo método.

El presente trabajo compara los resultados obtenidos, discute las ventajas y desventajas del ensayo de carga dinámico y propone recomendaciones de cómo debería usarse en nuestro país como parte de un sistema de control de calidad de fundaciones por pilotes.

GENERALIDADES

Las principales características de los ensayos estáticos y dinámicos de carga son:

Ensayos estáticos lentos de carga.

Procedimiento del ensayo (Norma ASTM D1143-81 (Reapproved 1987), NBR 6122, 2000)

- La carga es aplicada en incrementos, hasta la estabilización de los desplazamientos, como mínimo 30 minutos y como máximo 2 horas. Se define la estabilización de desplazamientos cuando la tasa de deformación es menor o igual a 0.25 mm/h.
- Se mantiene la carga máxima luego de la estabilización de los desplazamientos, como mínimo 12 horas y como máximo 24 horas.
- Se realiza la descarga en escalones, hasta la estabilización de los desplazamientos, como mínimo 30 minutos y como máximo 1 hora.
- En cada escalón de carga o descarga se toman registros de carga y desplazamientos.
- Se presentan los resultados en forma de gráficos carga-deformación.

La carga se aplica mediante un pistón hidráulico accionado por una bomba, y se mide ya sea con una célula de carga o un manómetro debidamente calibrados. La reacción es proporcionada por una carga muerta, o por una viga de reacción fija a pilotes trabajando a tracción.

Los asentamientos se miden con micrómetros montados en vigas de referencia independientes del movimiento del pilote de ensayo.

Figura 1. Dispositivos de ensayo a) pilotes de reacción, b) y c) carga muerta como reacción



Ensayos dinámicos de carga.

El Ensayo Dinámico difiere de las tradicionales pruebas de carga estáticas en que la carga es aplicada dinámicamente, por medio del impacto de una pesa adecuada. Se instalan sensores en el fuste del pilote que envían señales por cable al equipo PDA (Pile Driving Analyzer), donde son almacenadas y procesadas para su posterior análisis.

El Ensayo Dinámico se basa en la teoría unidimensional de la onda. Al golpear verticalmente la cabeza de un pilote, se genera una onda de tensión que se propaga por su fuste. Las irregularidades del pilote, o la variación en el suelo encontrado generan ondas reflejadas que viajan hacia la cabeza del pilote. Se colocan sensores diametralmente opuestos próximos a la cabeza del pilote registrando las ondas reflejadas que pasan por esa sección. El programa considera el material del que está construido el pilote como homogéneo y con una velocidad de propagación fija característica del mismo. Los sensores son de dos tipos:

- *transductor de deformación específica (sensores de fuerza):* genera un voltaje proporcional a la deformación sufrida por el pilote, se obtiene la variación de la fuerza

respecto al tiempo. El PDA utiliza el promedio de las dos señales de fuerza obtenidos, para compensar los efectos de la excentricidad del golpe.

- *acelerómetro (sensores de velocidad)*: genera un voltaje proporcional a la aceleración de las partículas del pilote. La señal de cada acelerómetro es integrada, se obtiene la variación de la velocidad de desplazamiento de la partícula con el tiempo. El PDA también trabaja en este caso con el promedio de las dos señales de velocidad

El principal objetivo del Ensayo Dinámico es obtener la capacidad de carga del pilote. Sin embargo, paralelamente otros datos pueden ser obtenidos, como:

- Tensiones máximas de compresión y tracción en el pilote durante el ensayo.
- Nivel de flexión sufrido por el pilote durante el golpe.
- Información sobre la integridad del pilote,
- Energía efectivamente trasferida para el pilote (eficiencia del sistema de hinca).
- Desplazamiento máximo del pilote durante el golpe.

CAPWAP (CAse Pile Wave Analysis Program) es un procedimiento de ajuste de señal, basado en el registro de la velocidad y la fuerza ejercida sobre la superficie del pilote a partir del golpe de un martillo, obtiene los parámetros de resistencia estática y dinámica del suelo sobre el pilote

A través del análisis CAPWAP es posible discriminar la parte de resistencia debida a fricción y a la resistencia de punta, y determinar la distribución de fricción a lo largo del fuste. Ese análisis, generalmente hecho posteriormente en la oficina a partir de los datos almacenados por el PDA, permite también obtener otros datos de interés, como el límite de deformación elástica del suelo.

El programa CAPWAP permite analizar el comportamiento del pilote en base a la información del suelo y del pilote introducida y a los resultados de campo. Para el análisis se deben ajustar tres variables: fuerzas internas del pilote, desplazamientos del pilote y fuerzas externas. Para el análisis se utilizan los registros de la fuerza, o la velocidad, o su promedio y se compara con los calculados por el programa, que usa un modelo de suelo y pilote previamente asumidos. Las diferencias entre la curva de fuerza obtenida a partir de las mediciones en campo y la curva obtenida a partir del programa permiten sacar conclusiones relacionadas a las diferencias entre el comportamiento real del suelo y los parámetros de suelo asumidos. La modificación de dichos parámetros permitirá obtener un mejor ajuste del modelo en una subsiguiente iteración.

CAPWAP asume que las reacciones del suelo son elasto-plásticas y viscosas lineales. De esta manera, el modelo del suelo tiene tres variables: la resistencia estática última, la deformación elástica del suelo y una constante de amortiguación.

El éxito del análisis realizado con CAPWAP para predecir la capacidad soporte del pilote depende de varias suposiciones, entre ellas:

- La estimación de la resistencia estática del suelo es realista
- El ensayo dinámico del pilote fue realizado durante el rehincado habiendo esperado el tiempo suficiente luego de la ejecución del pilote
- Buena calidad en la medición de datos
- El pilote fue representado adecuadamente
- La energía del martillo fue suficiente para mover el pilote
- El ajuste de la señal es satisfactoria

El PDA informa en campo otros resultados, como máximas tensiones durante el golpe y energía máxima transferida.

Si sólo se desea confirmar si los pilotes atienden a los requisitos de proyecto, el Ensayo Dinámico puede ser suficiente. Si se desea determinar la carga real de rotura de un pilote, será necesario efectuar una prueba de carga estática, necesariamente llevada hasta la rotura (y no extrapolada, caso en que tendrá el mismo valor que el Ensayo Dinámico).

En suelos con características poco comunes o desconocidas, es siempre aconsejable hacer por lo menos una prueba estática de verificación, para comprobar si la metodología adoptada para los Ensayos Dinámicos es adecuada.

ENSAYOS REALIZADOS EN ANP

El LCCF, realizó en los meses de febrero-abril de 2008 dos ensayos estáticos y cuatro ensayos dinámicos de carga a compresión en la obra de prolongación del Colector Colombia (Puerto de Montevideo), colaborando las empresas Alvaro Palenga y Pilotes Victor.

En función de las cargas móviles, previstas por ANP, que podrían circular sobre el colector, la carga admisible requerida para los pilotes fue de 40 t.

Considerando que los pilotes de ensayo serían utilizados en las fundaciones de la obra, la carga máxima de ensayo se fijó en 60 t (150% de su carga admisible). La Tabla 1 expone las características de los pilotes ensayados. En los pilotes P12-5C y P13-5A no se indica la longitud estimada por el ensayo de integridad (PIT), debido a que la señal obtenida no mostró una clara reflexión de punta a partir de la cual estimar la longitud.

Tabla 1. Características de los pilotes ensayados

Identificación	Longitud nominal (m)	Longitud estimada por PIT (m)
P9-2B	8.0	7.7
P12-1C	8.3	-
P12-5C	8.0	6.6
P13-5A	7.3	-

Ensayos estáticos en ANP

El dispositivo fue diseñado en conjunto entre el LCCF y la empresa Alvaro Palenga.

La carga fue suministrada por un pistón hidráulico operado por una bomba manual con manómetro digital. La capacidad del sistema de carga utilizado es de 960 kN (96 t).

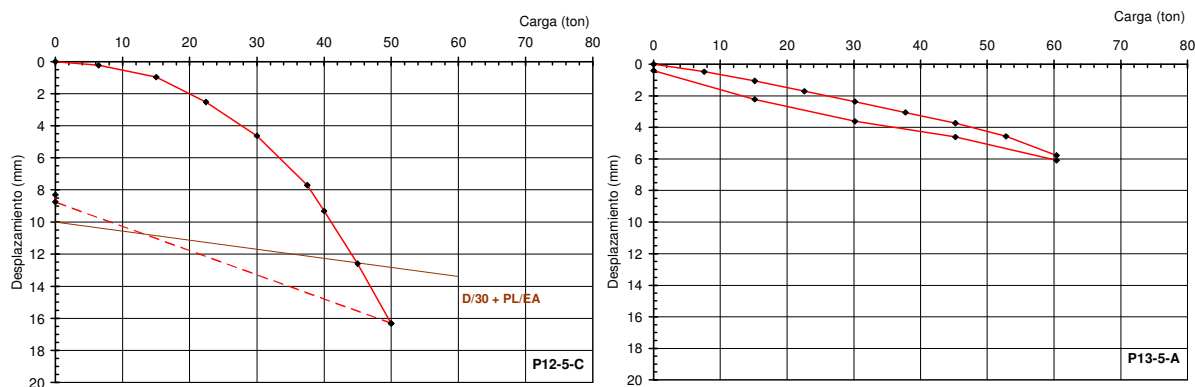
Figura 2. Fotos del dispositivo para ensayo de carga estático



En el montaje utilizado, la reacción contra la cual actúa el cilindro hidráulico es proporcionada por una viga de acero sobre la que se apoya una plataforma de acero sobre

la que se dispusieron 120 rieles de ferrocarril, con una carga muerta superior a las 90 t. Como sistema de registro de desplazamientos se dispusieron dos flexímetros diametralmente opuestos, apoyados en una viga de madera fija en dos bases de hormigón a más de 2 m del pilote de forma de evitar interacciones entre pilote y bases.

Figura 3. Gráficas carga-desplazamiento, pilotes P12-5C y P13-5A



La Figura 3 presenta los gráficos carga–desplazamiento de los dos ensayos estáticos. Los pilotes fueron ensayados en acuerdo con la normativa internacional. No se constataron inconvenientes en el desarrollo de los ensayos. En cuanto a los resultados obtenidos, puede apreciarse que el comportamiento de los dos pilotes ensayados es muy diferente.

El pilote 12-5C tiene un comportamiento carga-desplazamiento no lineal prácticamente en todo el ensayo. Los valores de desplazamiento alcanzados son mayores que los que considera la norma brasilera de fundaciones NBR 6122 para evaluar la carga de rotura:

desplazamiento= $D/30+PL/EA$ siendo, D=diámetro del pilote (mm), P=carga, L=longitud del pilote, E=módulo de elasticidad y A= sección del pilote

La respuesta del pilote frente a la carga es característica de un pilote con muy poca a ninguna resistencia de fuste, su carga de rotura fue estimada en 45 t. Los valores obtenidos de desplazamiento remanente luego de la descarga total son considerables, lo cual confirma que se llegó a superar la capacidad portante del pilote.

El pilote 13-5A tiene un comportamiento lineal hasta las 52.5 t, los desplazamientos alcanzados son sensiblemente menores al anterior y a la rotura definida según la norma brasilera NBR 6122. Los desplazamientos remanentes luego de la descarga son casi nulos, esto confirma, junto con el comportamiento lineal registrado, que la respuesta del pilote se encuentra en el período de deformación elástica.

Ensayos dinámicos en ANP

El dispositivo necesario para el ensayo dinámico de carga en este caso es muy sencillo. Se trata de prolongar el pilote a ensayar dejando únicamente armadura saliente que tendrá el rol de guía de la pesa. Se adosan al pilote dos sensores de tensión y dos acelerómetros piezoeléctricos diametralmente opuestos dos a dos.

Para aplicar los golpes se utilizó la pesa de la pilotera de 1200 kg. El ensayo se realizó con la metodología de energía creciente, aumentando la altura de caída en cada golpe sucesivo, dando 3 impactos por pilote con una altura mínima de 0.50 m y máxima de 1.50 m.

Durante los ensayos, los resultados fueron seguidos con el programa PDA, lo que permitió controlar en cada golpe los valores máximos de compresión y tracción en el hormigón de forma de no superar los admisibles y asegurar la integridad estructural del pilote.

Figura 4. Dispositivo ensayo dinámico, gráficas carga-desplazamiento estáticas, pilotes P12-5C y P13-5A según el programa CAPWAP

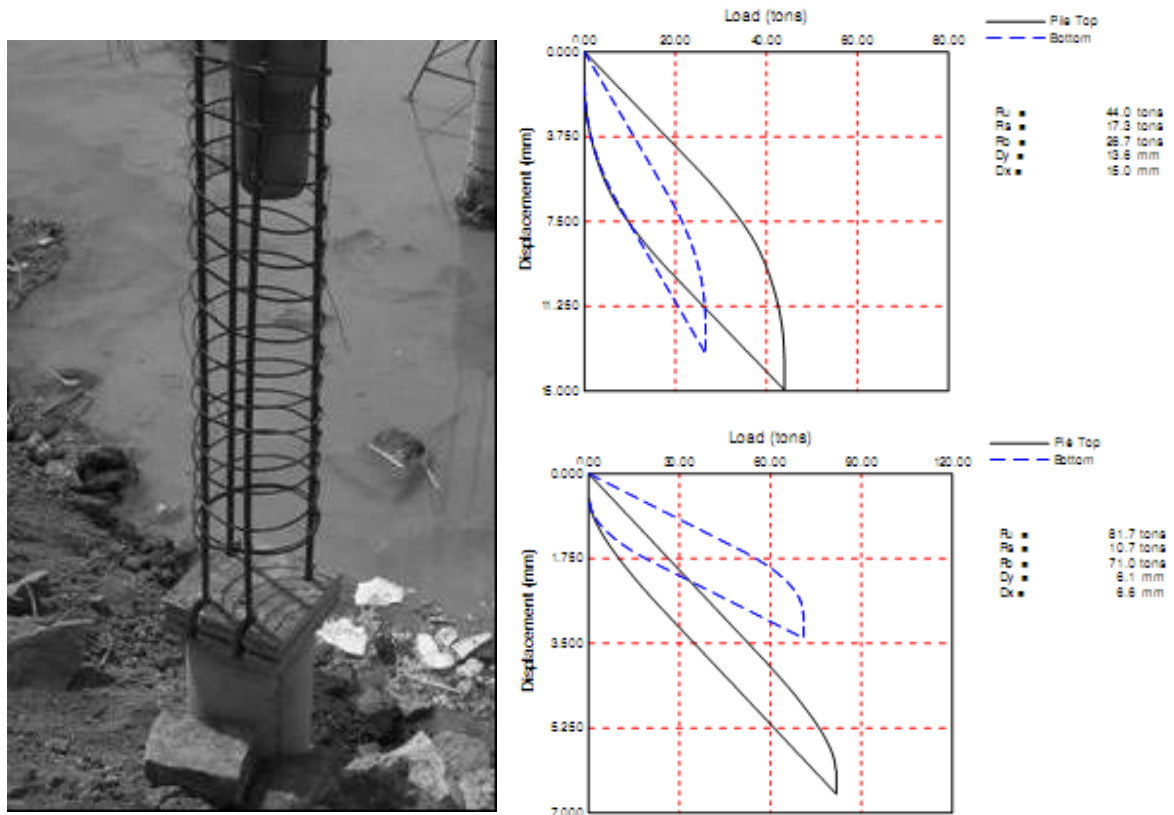
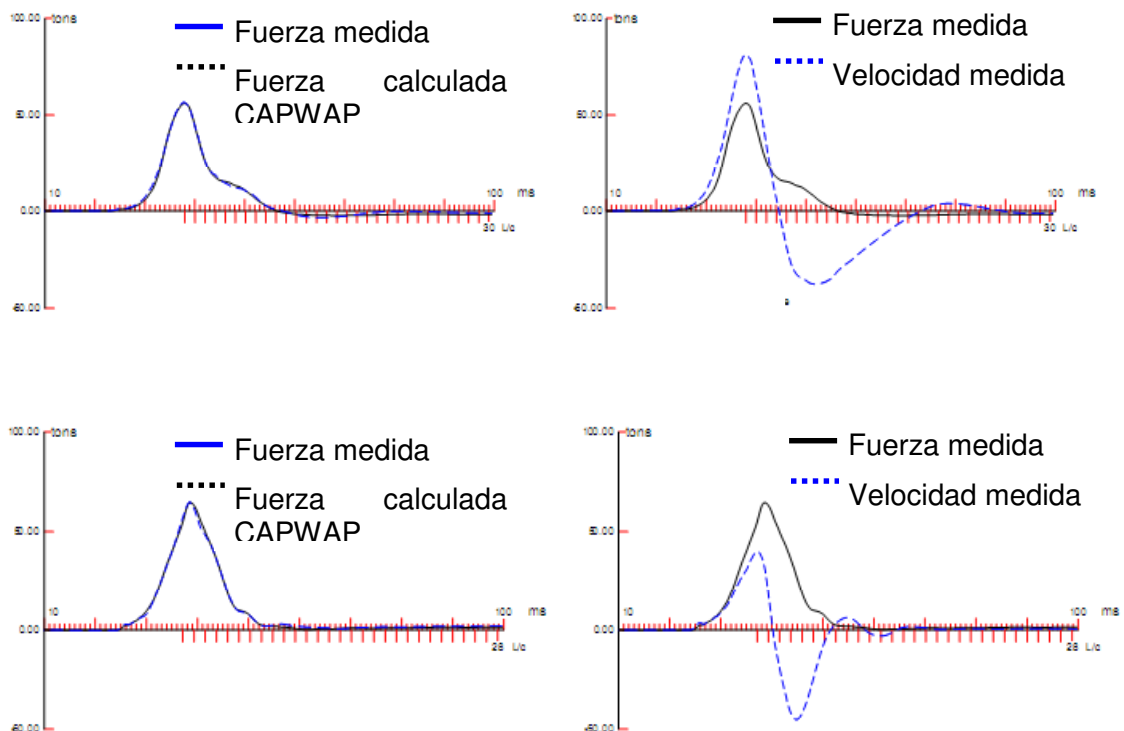


Figura 5. Gráficas de fuerza (izquierda) y de fuerza y velocidad, ajuste según el programa CAPWAP: pilotes P12-5C y P13-5A



En el caso de los pilotes P9-2B, P12-1C y P12-5C se puede afirmar que se logró movilizar la totalidad de la capacidad de carga, dada la importancia de las deformaciones remanentes constatadas en el ensayo dinámico. Por lo cual la resistencia máxima movilizada se corresponde con la carga de rotura del pilote.

Mientras tanto, en el pilote P13-5A no fue movilizada la totalidad de su capacidad de carga, dado que las deformaciones remanentes observadas en el ensayo dinámico fueron casi nulas. Este aspecto debe tenerse en cuenta al momento de interpretar el gráfico carga estática-deformación producido a partir del modelo CAPWAP, dado que en este caso la carga máxima indicada en el gráfico no corresponde a la carga de rotura del pilote.

Los ensayos estáticos y dinámicos tuvieron un comportamiento compatible entre sí. Los ensayos realizados en un mismo pilote marcaron una buena aproximación entre el ensayo estático y el dinámico.

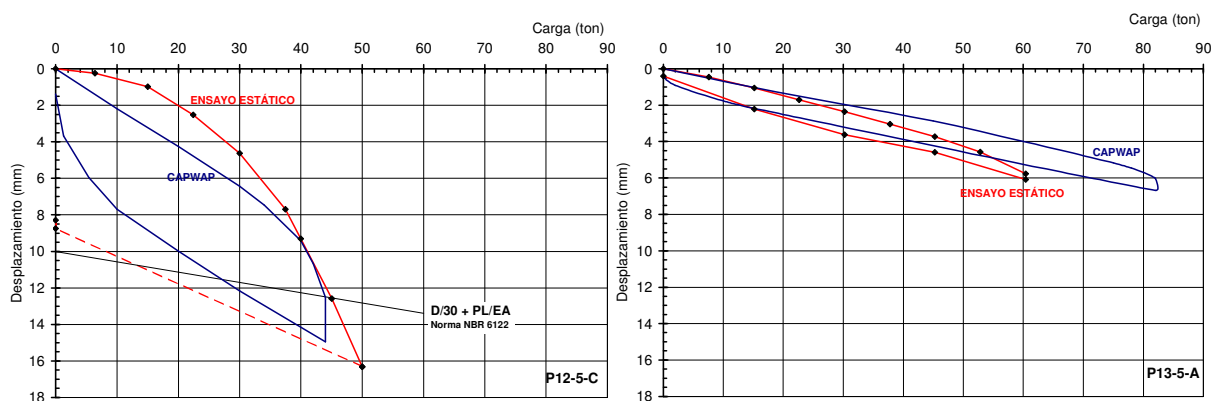
La Figura 6 (izquierda) compara los resultados obtenidos en el pilote P12-5C, en el ensayo estático con la gráfica carga estática-desplazamiento obtenida a partir de CAPWAP. En la Figura se observa muy buena correspondencia con relación a la carga de rotura: 45 t en el ensayo estático (según NBR 6122) y 44 t a partir de CAPWAP. En cuanto a la previsión de deformaciones, se observan algunas diferencias entre el comportamiento previsto por el modelo CAPWAP y el comportamiento medido en el ensayo estático:

en el período de carga, el modelo CAPWAP se muestra menos rígido, previendo deformaciones mayores que las medidas en el ensayo estático;

la deformación remanente prevista por el modelo CAPWAP es sensiblemente menor que la medida en el ensayo estático.

Cabe señalar que la deformación asociada a la carga de rotura es coincidente en ambos gráficos.

Figura 6. Comparación de resultados de ensayos estáticos P12-5C y P13-5A según el ensayo estático de carga y modelización por programa CAPWAP



Análogamente, la Figura 6 (derecha) compara los resultados obtenidos en el pilote P13-5A, en el ensayo estático con la gráfica obtenida a partir de CAPWAP. En este caso no se llegó a movilizar la carga de rotura. En cuanto a la previsión de deformaciones, el modelo CAPWAP se muestra más rígido, previendo deformaciones menores que las medidas en el ensayo estático. Sin embargo se observa una buena concordancia de valores hasta una carga de 30 t. En cuanto a las deformaciones remanentes medidas en el ensayo estático y previstas por el modelo de CAPWAP, en ambos casos resultaron prácticamente nulas.

CONCLUSIONES

Con respecto a los ensayos realizados en la obra del Colector Colombia:

Considerando los resultados de los cuatro ensayos dinámicos y los dos ensayos estáticos realizados, se puede concluir que existe una coincidencia más que aceptable entre los

valores de carga máxima estimados a partir de los ensayos dinámicos y los medidos en los ensayos estáticos. En cuanto a las curvas carga-deformación previstas por el CAPWAP y medidas en los ensayos estáticos, se puede afirmar que presentan andamios similares con valores característicos del mismo orden.

Con respecto al control de calidad de fundaciones por pilotes:

Las perspectivas de futuro van más allá de tener un ensayo más económico y rápido que el ensayo estático de carga. Hasta la introducción del ensayo dinámico de carga el control de diseño era casi impracticable, dado que al realizarse en base a ensayos estáticos obligaba a que la obra debiera comenzarse con la construcción de un pilote de prueba, con todas las esperas ya comentadas. Los tiempos de obra obligan a que una vez que la pilotera llega a obra deba comenzar a construir pilotes en forma inmediata.

En la situación actual, el ensayo dinámico puede hacerse a los pocos días de realizado el primer pilote en obra, sin requerir la preparación de un dispositivo especial de ensayo, por lo que tal vez al final de la primer semana se puede tener una muy buena aproximación de la resistencia del pilote pudiéndose hacer los ajustes de producción necesarios, como por ejemplo la longitud.

Por otra parte, la complejidad del armado de los ensayos estáticos de carga hace que de hecho no se lleven a cabo en la práctica, y en el caso de realizarse, sólo se puedan ejecutar uno o dos pilotes en obras importantes. El ensayo dinámico abre la posibilidad de hacer más ensayos en menos tiempo, pudiéndose realizar un verdadero control de calidad no solo de una correcta ejecución (ensayo de integridad) sino de capacidad portante del producto.

En una obra pequeña, de aquí en más, el control de calidad del pilotaje podrá limitarse a la aplicación del control en base a los ensayos de integridad y algunos ensayos de carga dinámicos. En una obra como la citada, con 400 pilotes, podrá establecerse un programa de control de calidad y procedimiento como el siguiente:

Al comienzo de obra (calibración del diseño): Un ensayo de carga estático sobre el primer pilote construido, y un ensayo dinámico a posteriori sobre el mismo pilote, calibración y ajuste de la producción según los resultados de los ensayos.

Durante la obra (Control de producción y ejecución): Ensayos de integridad sobre la totalidad de los pilotes

Previo a la finalización de la obra (control de recepción): Ensayo de carga estático sobre un pilote seleccionado y ensayo dinámico sobre el mismo pilote, además de 5 ensayos dinámicos sobre otros pilotes seleccionados.

BIBLIOGRAFÍA

Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. "Informe sobre ensayos estáticos y dinámicos de carga de pilotes a compresión Colector Colombia – Puerto de Montevideo". Uruguay. 2007

Pile Dynamics, Inc. "Case Pile Analysis Program". USA. 2006

Norma ASTM D1143-81. USA. 1987

Norma NBR 6122. Brasil. 2000