

# Pruebas de carga dinámicas en micropilotes. Comparación con pruebas de carga estática.

Oteo, C.  
*Universidad de A Coruña.*

Arcos J.L. & Gil, R.<sup>1</sup>  
*Rodio Kronsa S.L.U.*

Fernández Tadeo, C.  
*CFT & Asociados, S.L.*

Tema : Cimentaciones superficiales y profundas. Auscultación y patología.

## RESUMEN

Hoy en día los micropilotes son usados en muchas aplicaciones, incluyendo el recalce de cimentaciones ya existentes. La mejora de la técnica encaminada a soportar cargas cada vez mayores y el desarrollo de rápidos métodos de control es cada día más necesario. En este proyecto se acondicionó un área de ensayo, en Algete (Madrid), donde fueron ejecutados tres micropilotes de 3, 5 y 7 metros de longitud. Sobre estos micropilotes se realizaron pruebas de carga dinámicas. Un martillo hidráulico fue desarrollado para este ensayo y el analizador de hincas de pilotes (PDA) fue el equipo utilizado para evaluar la capacidad portante de los micropilotes. Adicionalmente, una prueba de carga estática fue realizada sobre un micropilote del área de ensayo ejecutado para tal fin. En este artículo se comparan los resultados obtenidos con el analizador de hincas y los procedentes de la prueba de carga estática. Las características del suelo son tenidas en cuenta para analizar la correlación entre los dos tipos de ensayo. Finalmente, se dan recomendaciones para evitar que durante la ejecución de la prueba dinámica se produzcan daños sobre el micropilote.

Micropilotes, Pruebas de carga dinámicas, Pruebas de carga estática, Analizador de hincas de pilotes (PDA)

## 1 INTRODUCCIÓN

Los trabajos de micropilotaje son muy comunes en España y se usan para una amplia variedad de aplicaciones y suelos. Micropilotes muy armados con elevadas capacidades portantes son requeridos en muchos proyectos. Diámetros de 300 mm con capacidades superiores a 2500 kN son cada vez más comunes en trabajos de edificación, tanques y cimentaciones de puentes.

Las pruebas de carga en micropilotes son a menudo estipuladas como parte de las especificaciones de proyecto en grandes construcciones, y los ensayos dinámicos pueden convertirse en

una parte importante del control de calidad de la obra, siendo un complemento o alternativa a los ensayos de carga estática.

Rodio Kronsa S.L.U. junto con la Universidad de La Coruña inició en Octubre de 2006 un proyecto de investigación que en una primera fase supuso la ejecución y ensayo de tres micropilotes con 3, 5 y 7 metros de longitud.

Se realizaron ensayos de carga dinámica usando un martillo de caída libre desarrollado para este evento. El equipo PDA de la empresa PDI fue utilizado para el registro de los datos y análisis CAPWAP<sup>®</sup> fueron realizados en todos los golpes.

---

<sup>1</sup> Autor para correspondencia, e-mail y dirección: rgil@rodiokronsa.es

Una predicción de “Clase A”, sin conocimiento del resultado del ensayo de carga estática, fue realizada en ese momento.

En diciembre de 2007, un nuevo micropilote de 7 metros de longitud fue ejecutado en las proximidades del área de ensayos dinámicos y se realizó sobre éste un ensayo de carga estática. A su vez, un nuevo ensayo de carga dinámico fue llevado a cabo en los micropilotes anteriormente ensayados.

Este documento presenta una visión general del plan de ensayos previsto, resume los resultados de los ensayos dinámicos y los compara con los datos obtenidos en la prueba de carga estática.

Recomendaciones para evitar un posible daño al micropilote son también incluidas.

## 2 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO DEL ÁREA DE ENSAYO

El terreno en el que se ubica el área de ensayos está formado por una primera capa superficial de grava de dos metros de espesor. Por debajo aparece una capa de arcillas limosas con arenas finas de más de 20 metros de potencia.

El nivel freático se sitúa a un metro de profundidad en el momento de realizar los ensayos.

## 3 ENSAYOS EN LOS MICROPILOTES.

### 3.1 Ensayo de carga dinámico

#### 3.1.1 Ejecución del micropilote

Rodio Kronsa ejecutó los micropilotes mediante perforación con martillo en cabeza, usando inyección simultánea de agua en todo el proceso y entubación provisional. El diámetro de los micropilotes fue de 150 milímetros.

Una vez terminada la perforación, la armadura, un tubo cilíndrico de acero con un diámetro exterior de 88,9 mm y 9 mm de espesor, fue introducida en el taladro.

Posteriormente, un tubo tremie, que se llevó hasta el final de la perforación, fue utilizado para la inyección de la lechada en el micropilote.

Después de la inyección, la entubación provisional fue retirada dando por finalizada la ejecución del elemento.

#### 3.1.2 Martillo de golpeo

Para llevar a cabo la prueba de carga, un martillo hidráulico y automático de caída libre fue diseñado y fabricado por Rodio Kronsa. Este martillo permitió un rápido posicionamiento en el micropilote a ensayar ya que podía ser montado en una máquina retroexcavadora convencional.

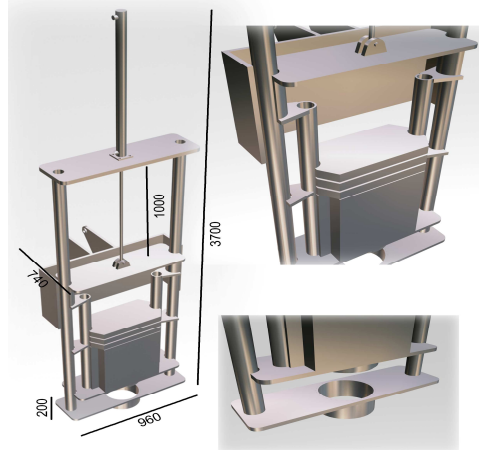


Figura 1. Detalle del martillo de golpeo.

El cuerpo del martillo está formado por un bloque compacto de 500 kg de peso suplementado con elementos adicionales hasta alcanzar una masa total de 1 tonelada. La máxima altura de caída que puede accionar el martillo es de 1 m (máxima energía de 1 m·t), aunque este valor es también ajustable.

Para una selección apropiada del martillo para la ejecución de la prueba de carga dinámica, Hussein et al. (1996) sugieren un peso en torno al 1,5 % de la capacidad estática que quiere ser verificada. En el ensayo, la resistencia estática a movilizar era elevada por lo que hubo que disponer de la máxima altura de caída del martillo, asumiendo algún riesgo respecto a la integridad del micropilote.

### 3.1.3 Resultados de los ensayos dinámicos

Para la realización de los ensayos dinámicos la cabeza del micropilote fue previamente preparada. En la armadura tubular del micropilote se realizaron ocho taladros para la colocación de los sensores. Por otro lado, fueron soldadas cuatro barras de refuerzo como las que habitualmente se colocan para la conexión al encepado. Dos acelerómetros piezoeléctricos y dos transductores de deformación fueron acoplados a la cabeza del micropilote con la ayuda de los taladros y un analizador de hinca de pilotes, modelo PAK, fue empleado para la toma de datos (PDI, 2004).

Para amortiguar los golpes, un cojín de madera de eucalipto de 10 cm de espesor fue colocado entre la cabeza del pilote y el martillo.

Para movilizar al máximo la resistencia del terreno se emplearon energías crecientes. Se empezó con un golpe de baja energía y, posteriormente, la altura de caída se fue incrementando hasta que el micropilote se movió varios centímetros. Los valores de penetración fueron registrados para todos los golpes.



Foto 1. Martillo de golpeo y micropilote con instrumentación.

Posteriormente a la toma de datos de campo, un análisis CAPWAP (CASE Pile Wave Analysis Program) fue realizado en todos los golpes para obtener la capacidad portante estática movilizada en la prueba.

Durante el ensayo se midieron desplazamientos significativos de la cabeza del pilote en los últimos golpes. Una vez que la resistencia por fuste fue movilizada y fatigada por los impactos, la capacidad disminuyó rápidamente. En los últimos golpes, el micropilote fue hincado con una penetración por golpe próxima a los 20 mm.

La capacidad última a partir del análisis CAPWAP para los micropilotes de 3, 5 y 7 m se representa gráficamente en las figuras 2, 3 y 4.

**MK-3m. Capacidad última vs Número de golpe**

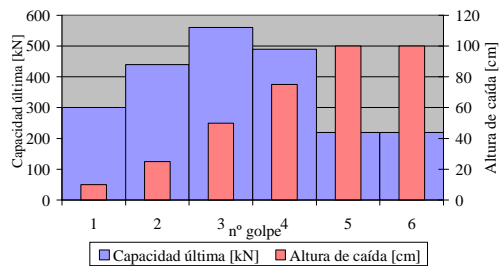


Figura 2. Capacidad última del micropilote de 3 m de longitud a partir del análisis CAPWAP.

**MK-5m. Capacidad última vs Número de golpe**

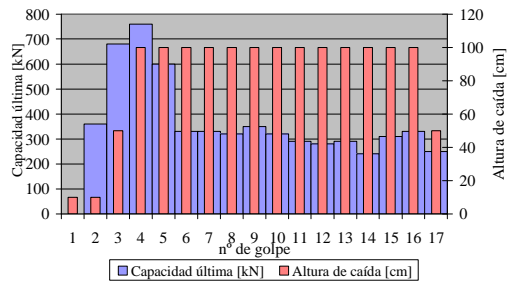


Figura 3. Capacidad última del micropilote de 5 m de longitud a partir del análisis CAPWAP.

**MK-7m. Capacidad última vs número de golpe**

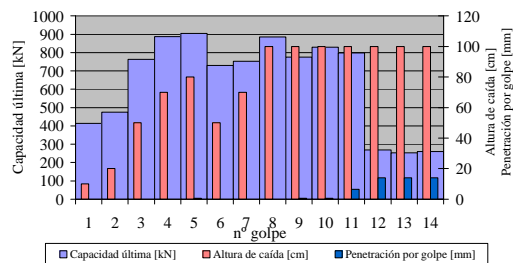


Figura 4. Capacidad última del micropilote de 7 m de longitud a partir del análisis CAPWAP.

### 3.2 Ensayo de carga estático

#### 3.2.1 Ejecución del micropilote y anclajes

Un nuevo micropilote de 7 m de longitud fue ejecutado para ser ensayado estáticamente. Este micropilote se encontraba a pocos metros de los tres ensayados dinámicamente en octubre de 2006.

#### 3.2.2 Procedimiento para la prueba de carga estática.

La carga estática fue aplicada con un gato hidráulico colocado sobre una placa de acero en la cabeza del micropilote. Este dispositivo actuaba contra un bastidor de reacción anclado. Las principales características del gato hidráulico eran:

- Máxima fuerza: 2243 kN
- Máxima presión de aceite: 700 bar
- Máximo recorrido: 160 mm

Se utilizó una bomba hidráulica automática complementada por una bomba manual para cargas iniciales pequeñas. Las presiones internas del gato fueron medidas usando un manómetro digital calibrado. El gato hidráulico fue calibrado con una prensa estática-dinámica modelo MTS en un laboratorio de calibración certificado.

El bastidor estaba formado por una viga metálica con forma de T, de lados 3,3 y 2,95 m. Fue anclado al terreno mediante tres anclajes de cable. Estos fueron tesados, antes de la realización del ensayo estático, con la ayuda de tres piezas metálicas apoyadas sobre placas contra el suelo. La mínima distancia desde el micropilote ensayado a las columnas y anclajes fue de 1 m. Varias placas de acero y una pieza metálica semiesférica fueron utilizadas para obtener un buen contacto entre el gato y el bastidor de reacción.

Dos medidores electrónicos de desplazamiento y un reloj comparador fueron usados para medir el asiento del micropilote durante el ensayo. Los comparadores electrónicos eran potenciómetros lineales de 75 mm de rango y 0,1 mm de precisión mientras que el reloj comparador tenía un rango de 50 mm y una precisión de 0,01 mm. Los comparadores fueron colocados sobre unas pequeñas placas de acero horizontales soldadas a

la armadura tubular de los micropilotes, bajo la cabeza de los mismos. Las medidas de los comparadores electrónicos fueron tomadas automáticamente cada 5 segundos usando un registrador de datos y un PC.



Foto 2. Gato hidráulico y bastidor de reacción.

Los comparadores se montaron sobre dos vigas de referencia paralelas de 5 m de longitud. Las vigas estaban firmemente soportadas en tierra a una distancia suficiente de los anclajes y de las columnas de soporte del bastidor. Una carpa fue instalada para impedir la insolación directa de las vigas de referencia o que la lluvia pudiese afectar la toma de medidas.

La carga fue aplicada en dos ciclos. El primero hasta una carga nominal de trabajo del micropilote de 33 t (323 kN) y el segundo ciclo hasta alcanzar la carga de fallo. Los escalones de carga fueron del 25% de la carga nominal de trabajo hasta alcanzar el 100%, e incrementos de 12t (118 kN) hasta alcanzar el fallo. El primer ciclo fue descargado en tres escalones iguales, y el segundo ciclo en 4 escalones. Durante cada intervalo, la carga era mantenida constante hasta que el asiento no superaba los 0,02 mm/5 minutos (0,25 mm/hora), con un máximo de 15 minutos (10 minutos en descarga).

#### 3.2.3 Resultados del ensayo de carga estática

Los resultados del ensayo de carga estática fueron los siguientes:

- El desplazamiento vertical en el primer ciclo hasta la carga nominal de trabajo fue de

1,95 mm. En la descarga, el desplazamiento remanente fue de 0,3 mm.

- El fallo del micropilote ocurrió de repente, a una carga de 100,4 t (984 kN), cuando el desplazamiento axial era de 17,7 mm.
- Después del fallo repentino, el micropilote no fue capaz de sostener la carga. La máxima carga aplicada mientras el desplazamiento vertical continuaba incrementándose fue de 81,8 t (802 kN).
- La descarga final comenzó cuando el desplazamiento vertical llegó a los 43 mm. El asiento remanente final fue de 34,6 mm.

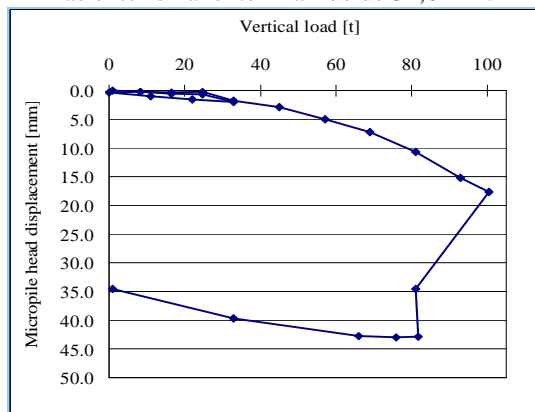


Figura 5. Resultado de la prueba de carga estática.

### 3.3 Comparación de los resultados de carga estática y dinámicas

Sobre los registros de todos los golpes se realizó un análisis no uniforme con el método CAPWAP. Las capacidades movilizadas obtenidas son compatibles con los resultados de la prueba de carga estática.

Los resultados de los ensayos estáticos y dinámicos han sido representados gráficamente en las gráficas 6 y 7.

En la gráfica 6 se comparan las curvas carga-asiento, calculadas en la simulación CAPWAP a partir de la modelización del terreno y el pilote para los golpes números 3 y 4, con los resultados de carga-desplazamiento del primer ciclo de carga estática (valor máximo de carga aplicada de 33 t). Se han escogido estos golpes iniciales como representativos del comportamiento del micropilote en fases tempranas de carga ya que la

deformación remanente medida en estas pruebas fue de 0 mm.

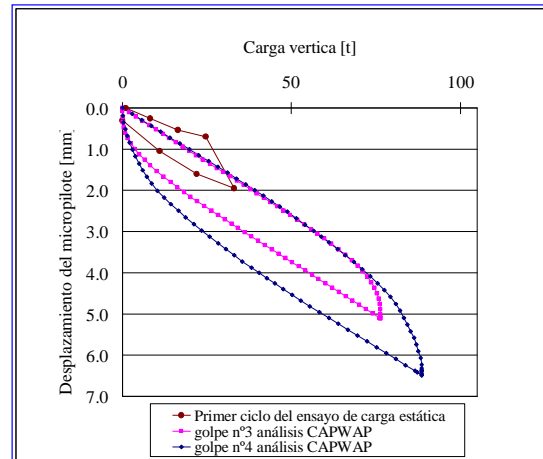


Figura 6. Primer ciclo de la prueba de carga estática y simulación estática CAPWAP para golpes 3 y 4.

Por otro lado, en la Figura 7 se muestra la simulación CAPWAP para el golpe n° 11, donde el desplazamiento permanente medido en el micropilote fue de 6.5mm y se compara con la prueba de carga estática completa.

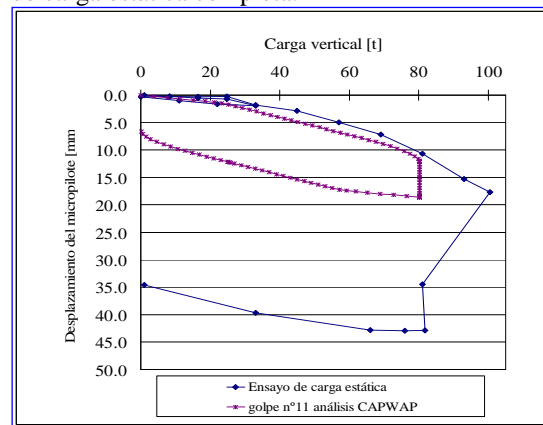


Figura 7. Ensayo de carga estática completo y curva de simulación CAPWAP para golpe n°11

Como se puede comprobar, el análisis CAPWAP ha proporcionado para este golpe, donde se consiguió un desplazamiento del micropilote apreciable en la prueba de carga dinámica, un comportamiento bastante similar al de prueba de carga estática por debajo del 80% de la carga de

fallo. Posteriormente, el resultado ha sido conservador.

### 3.4 *Discusión de resultados*

La simulación del análisis CAPWAP muestra un ajuste bastante aceptable con la prueba de carga estática dentro del rango de la carga de servicio. En cuanto al golpe nº11 donde, finalmente, el micropilote fue movilizado, el desplazamiento no excedió de 6.5 mm, lo que explica que el método encontrase más dificultades en predecir el comportamiento del micropilote con grandes deformaciones. Por otro lado, el hecho de que el micropilote tuviera que recibir 10 golpes antes de la movilización, hace pensar que parte del fuste se pudo fatigar en esos golpes previos y, por otro lado, confirma que el peso del martillo era pequeño para movilizar la carga de fallo.

En cualquier caso, los resultados máximos de la prueba de carga dinámica se situaron muy cercanos a la capacidad última del ensayo de carga estática, aunque el análisis dinámico no pudiera predecir el comportamiento del micropilote para asientos superiores a los 20 mm.

Respecto a la integridad del micropilote, un martillo con una masa mayor debería haber sido usado para disminuir la altura de caída y permitir la movilización en los primeros golpes. La colocación de una almohadilla de madera entre el micropilote y el martillo también se revela como adecuado en ensayos de este tipo.

Un nuevo ensayo dinámico fue realizado en Diciembre de 2007 coincidiendo con la prueba estática. Una importante recuperación de resistencia fue registrada respecto de los últimos golpes realizados el año anterior. Sobre el 80% de la carga de fallo inicial fue de nuevo calculada en el análisis CAPWAP.

## 4 CONCLUSIONES

En el momento actual de la investigación aquí presentada podemos obtener las siguientes conclusiones:

1. Las capacidades máximas obtenidas en el análisis CAPWAP presentaron un buen

ajuste con los resultados de la prueba de carga estática.

2. El comportamiento carga-asiento mostró un ajuste bastante aceptable con la prueba de carga estática dentro del rango de la carga de servicio.
3. Los resultados han demostrado el potencial de las pruebas de carga dinámicas de alta deformación como una valiosa herramienta para la evaluación del comportamiento de los micropilotes.

## REFERENCIAS

Jiménez Salas, J.A., Justo, J.L., Serrano, A. 1981. Geotecnia y Cimientos II. Editorial Rueda, Madrid.

Gomez, J., Cadden A., and Webster C. (2004). "Micropile Foundations in Karst: Static and Dynamic Testing Variability", Proceedings of Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Paper No. 9.05.

Hussein, M., Likins, G., Rausche F. (1996). "Selection of a hammer for high-strain dynamic testing of cast-in-place shafts", Proceedings of Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles: 759-772.

Kormann, A., Chamecki, P., Russo, L., Antoniutti, L., Bernardes, G. (2000). "Behavior of short CFA piles in an over consolidated clay based on static and dynamic load test", Proceedings of Sixth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles: 707-714.

Klingberg, D. and Mackenzie, P., (2000). "Static and dynamic testing of the 'Campile' - A displacement, cast-in-situ pile", Selection of a hammer for high-strain dynamic testing of cast-in-place shafts", Proceedings of Sixth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles: 715-718.

Holeyman, A., Maertens, J., Huybrechts and Legrand, C., (2000). "Results of an international pile dynamic testing prediction event", Proceedings of Sixth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles: 725-732.

William, J., Luiz, R. (2004). "Comparison of static and Dynamic Load Tests Results", Proceedings of Seventh International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles: 527-533.

CAPWAP Manual (2006). Pile Dynamics Inc. Cleveland, Ohio.

Poulos, HG., (2000). "Pile load test methods applications and limitations". Libro homenaje a J. A. Jiménez Salas. Ministe-

rio de Fomento, CEDEX y Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica, Madrid.

American Society for Testing and Materials. "Standard Test Method for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load", ASTM D 1143M-07.