

# **PRUEBAS DE CARGA EN CIMENTACIONES PROFUNDAS**

**RAFAEL GIL LABLANCA**

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
RODIO KRONSA. Departamento Técnico

## **1- Introducción**

En esencia, las pruebas de carga no son más que ensayos, a escala real, del comportamiento de una cimentación bajo la acción de diferentes esfuerzos. Nos van a permitir un diseño más racional y mucho más fiable que la capacidad estimada a partir de formulaciones estáticas o fórmulas dinámicas.

Con las pruebas de carga logramos una mejor comprensión del comportamiento del sistema pilote-suelo, lo que puede permitir una reducción de la longitud del pilote o un incremento en su carga de diseño. De hecho, pueden ser en sí mismas un método de diseño, recogido en el Eurocódigo y en el CTE-SE-C. En cualquier caso, pueden dar lugar a potenciales ahorros en los costes de cimentación.

Sin embargo, esta metodología no está muy extendida en España. Su empleo se reduce, en muchas ocasiones, a corroborar diseños, en general, demasiado conservadores, ya sea debido al grado de incertidumbre sobre determinados suelos o a la falta de formulaciones adecuadas para su análisis.

Los ingenieros somos, a veces, reticentes a recomendar pruebas de carga debido al incremento del coste o a los retrasos de tiempo previsible en las diferentes fases del proyecto. Sin embargo, los costes deberían ser contrapesados con los posibles beneficios. Por otro lado, los retrasos en la fase de diseño o construcción usualmente ocurren cuando la decisión de realizar pruebas de carga es añadida tarde al proyecto.

Afortunadamente, cada vez son más las obras de cimentación donde las pruebas de carga tienen un papel fundamental en el diseño y la ejecución. Técnicas como la del pilote prefabricado hincado no se conciben, hoy en día, si no van asociados a pruebas de carga dinámicas que permitan verificar los criterios de rechazo adoptados o las longitudes estimadas.

Esperamos que este artículo contribuya a difundir más esta metodología en las obras de cimentación profunda en España.

## **2- Pruebas de carga**

### **2.1. Métodos**

Tradicionalmente, los diversos métodos de pruebas de carga han sido caracterizados por la duración con que la fuerza es aplicada al pilote. Los ensayos de carga estática aplican fuerzas significativas durante considerables periodos de tiempo para evaluar la capacidad portante del pilote. En las pruebas de carga dinámica y los ensayos de carga rápida, aunque la fuerza es comparable en magnitud a la del ensayo

estático, es aplicada durante un periodo más corto de tiempo. Es necesario, por tanto, una cuidadosa interpretación de los efectos dinámicos para obtener las capacidades de carga estática.

En la figura 1 se compara el tiempo de aplicación de la fuerza de una prueba de carga dinámica frente al método Statnamic:

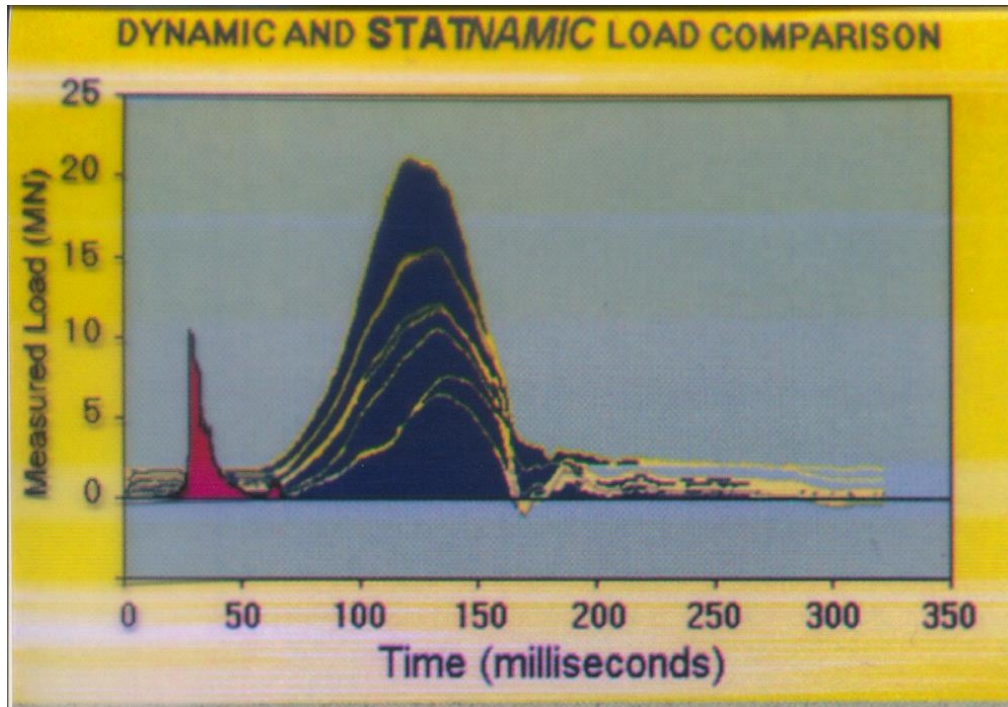


Figura 1. Comparación del tiempo de aplicación de la carga

Los diferentes tipos de ensayos y su aplicación son resumidos más abajo. Con más detalle serán analizados en los siguientes puntos de este artículo.

Las pruebas de carga bidireccional se han incluido en un apartado independiente, aunque se trata de un tipo de ensayo de carga estática. Hemos considerado que este método tiene suficiente entidad para figurar como un tipo de ensayo aparte.

Los ensayos de carga estática requieren un sistema de reacción adecuado para la aplicación de la carga. Algunos sistemas típicos de reacción serán descritos en el punto 3.

Diferentes tipos de instrumentación pueden ser incorporadas a pilotes de ensayo preliminares con el fin de investigar el mecanismo de transferencia de carga durante el ensayo. Los pilotes pueden ser equipados con extensómetros, células de carga, sensores de fibra óptica u otros dispositivos que permitan aislar partes de la información suministrada por el ensayo y así mejorar el análisis de los resultados obtenidos. Este tipo de equipamiento requiere una cuidadosa selección, instalación y seguimiento adicional.

## 2.2. Pruebas de carga estática

La prueba de carga estática es el método que simula mejor el comportamiento real del pilote bajo carga. Dependiendo del tamaño del proyecto, las pruebas de carga estática pueden ser realizadas durante la fase de diseño o durante la construcción. Los tipos de pruebas de carga convencionales incluyen el ensayo de compresión axial, el ensayo a tracción y el de carga lateral. En estas pruebas, la carga es normalmente aplicada en incrementos discretos y se registra el movimiento del pilote. Los incrementos de carga subsiguientes son solo aplicados cuando el mínimo periodo de tiempo especificado ha transcurrido y la velocidad del asiento medido por los sensores es inferior al criterio indicado en el procedimiento.

### **2.3. Pruebas de carga dinámicas**

Las pruebas de carga dinámicas utilizan las medidas de deformación y aceleración tomadas cerca de la cabeza del pilote cuando un golpe es aplicado sobre el pilote mediante un martillo de hinca, o un dispositivo específico diseñado para tal fin. Estas medidas dinámicas pueden ser usadas para estimar la resistencia del suelo que sería movilizada bajo condiciones de carga estática, basándose en la teoría de ecuación de onda.

Desarrollado inicialmente para su uso con pilotes hincados en los que son universalmente aceptados, los ensayos dinámicos en pilotes “in situ” son cada vez más empleados para predecir la resistencia estática del suelo y el comportamiento carga-asiento. El método de ensayo es similar al usado en pilotes hincados, con la monitorización de los golpes del martillo y el subsiguiente análisis de la respuesta del pilote a la propagación de la onda de tensión. Un martillo específico es usualmente desplazado a obra para aplicar la carga dinámica al pilote “in situ”.

### **2.4. Pruebas de carga bidireccional**

Un método alternativo para la evaluación de la capacidad del pilote es la prueba de carga bidireccional (conocida por el nombre comercial de Célula Osterberg). Esta prueba nos permite de manera simple y eficiente llevar a cabo un ensayo de carga estática en una cimentación profunda. La célula Osterberg es una célula de carga colocada en la punta o en el fuste del pilote dentro de la perforación durante la operación de hormigonado. En pilotes hincados es generalmente acoplada a su punta. En el ensayo, la célula es expandida hidráulicamente de tal forma que la parte superior del pilote reacciona contra la parte inferior.

### **2.5. Ensayo de carga rápida**

Los ensayos de carga rápida usan o un cilindro de combustión interna con unos contrapesos de reacción, o una maza de caída libre sobre sistemas de amortiguación. La medida de la carga aplicada se realiza mediante células de carga, y la medida del desplazamiento de la cabeza del pilote mediante acelerómetros y niveles ópticos especiales. En este ensayo, la longitud de la onda de compresión es suficientemente larga para abarcar la totalidad del pilote y, por tanto, no es necesario un análisis de ecuación de onda complejo cuando se interpretan los resultados. Sin embargo, al igual que en los ensayos dinámicos, hay efectos que pueden tener una influencia significativa sobre los resultados, aunque en menor medida, al ser la velocidad de aplicación de la carga menor.

## **3- Pruebas de carga estática**

### **3.1. Ensayos de carga a compresión**

Los ensayos a compresión son los más habituales en pilotes, aunque también pueden ser ensayados a tracción y a carga lateral. Normalmente, la prueba de carga incluye los siguientes pasos:

1. El pilote es puesto en carga de manera incremental aplicando la fuerza en cabeza y usando una secuencia predeterminada. La carga puede también ser aplicada de manera continua, a velocidad constante.
2. Se registran las medidas de carga, tiempo y movimiento de la cabeza del pilote durante la duración del ensayo.
3. Se dibuja una curva carga-asiento.
4. La carga de fallo y el desplazamiento en el momento del fallo son determinados por uno de los métodos de interpretación existentes.
5. El movimiento es medido normalmente en cabeza. Sin embargo, el pilote puede ser instrumentado para determinar el movimiento en cualquier punto a lo largo del fuste.

La fotografía de la figura 2 ilustra el planteamiento general de un ensayo de carga de carga a compresión.



Figura 2. Ensayo de carga a compresión (RK)

### 3.1.1. Instrumentación y sistemas de reacción

Los movimientos en la cabeza del pilote son medidos habitualmente con relojes comparadores y transductores potenciométricos de desplazamiento que miden el movimiento entre la cabeza del pilote y una viga de referencia soportada independientemente.



Figura 3. Instrumentación de prueba de carga a compresión (RK)

Un mínimo de dos comparadores equidistantes del centro del pilote y en posiciones diametralmente opuestas deberían ser usados. Los soportes de la viga de referencia deben mantener una distancia libre de al menos 2,5 m al pilote de ensayo. En la fotografía de la figura 3 se ilustra una instrumentación típica de una prueba de carga estática.

En la mayor parte de las ocasiones las cargas son aplicadas mediante un cilindro hidráulico actuando contra una viga anclada mediante pilotes o anclajes al terreno, o por reacción contra una plataforma con contrapesos. Para minimizar las excentricidades en la aplicación de la carga, una rótula esférica debería ser incluida en el sistema de aplicación de la carga.

En la fotografía de la figura 2 el anclaje de la viga de reacción se ha realizado mediante pilotes prefabricados hincados. La fotografía de la figura 4 ilustra una prueba de carga sobre un pilote “in situ” donde el sistema de reacción utilizado ha sido mediante anclajes al terreno.



Figura 4. Reacción mediante anclajes al terreno (Terratest).

La fotografía de la figura 5 ilustra el caso en el que sistema de reacción ha consistido en una plataforma con contrapesos.

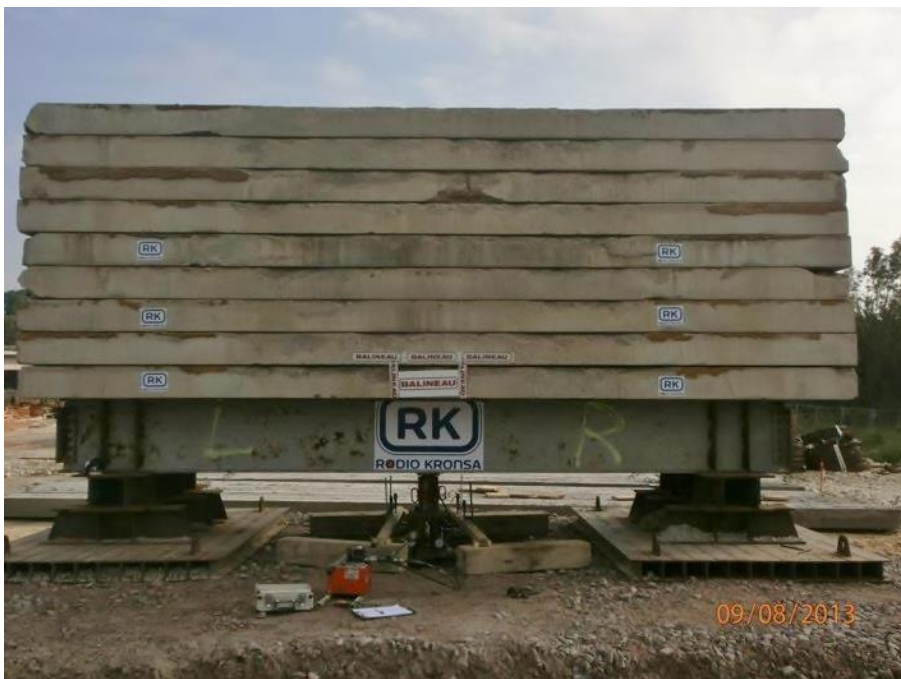


Figura 5. Reacción contra una plataforma con contrapesos (RK)

En ocasiones, la instrumentación interior del pilote juega un papel fundamental, especialmente si se trata de proyectos de investigación. Puede llegar a ser especialmente complicado como en el proyecto PITERM, para la caracterización termo-mecánica de pilotes termoactivos, donde la instrumentación colocada en una pieza del pilote prefabricado debía conectarse con la siguiente a través de la junta como muestra la fotografía de la figura 6.



Figura 6. Instrumentación pilote prefabricado en proyecto PITERM (RK)

En este proyecto, se trataba de simular térmicamente el funcionamiento en calefacción y refrigeración de un edificio y analizar su influencia en el comportamiento mecánico del pilote termoactivo a largo plazo. Para ello se construyó, adyacente al pilote hincado, una instalación térmica que permitía inyectar y extraer calor del pilote simulando las condiciones del sistema de climatización. Esta instalación contaba con caudalímetros y sensores de temperatura monitorizados remotamente. De esta forma, se podía controlar en todo momento las solicitaciones térmicas a las que era sometido el pilote, pudiendo variar las condiciones de ensayo, es decir, los pulsos térmicos inyectados o extraídos, simulando la carga térmica del “edificio”.

Para la simulación de las cargas mecánicas estáticas se empleó un bastidor anclado al terreno y un cilindro hidráulico que aplicaba la carga estática. Fue necesario el diseño de un caballete en la cabeza del pilote que permitiese al mismo tiempo la transmisión de la carga proveniente del cilindro y la salida de las sondas geotérmicas por el hueco central del pilote. En la fotografía de la figura 7 se puede ver el montaje de la instalación.

Este proyecto fue llevado a cabo por Rodio Kronsa en colaboración con el CEDEX, Energesis y la universidad Politécnica de Valencia.



Figura 7. Montaje general de la prueba para la caracterización termo-mecánica (RK)

### 3.1.2. Procedimiento de carga e interpretación de los resultados.

Es importante que se siga un procedimiento de ensayo de carga estandarizado. Se detallan varios procedimientos en la norma europea EN ISO 22477-1:2017 “Geotechnical investigation and testing – Testing of geotechnical structures – Part 1: Pile load test by static axially loaded compression” y en la norma estadounidense ASTM D1143M-07 “Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load”.

En la gráfica de la figura 8 se puede ver la propuesta de la norma europea EN ISO 22477-1 para ensayos de carga estática de ciclo único.

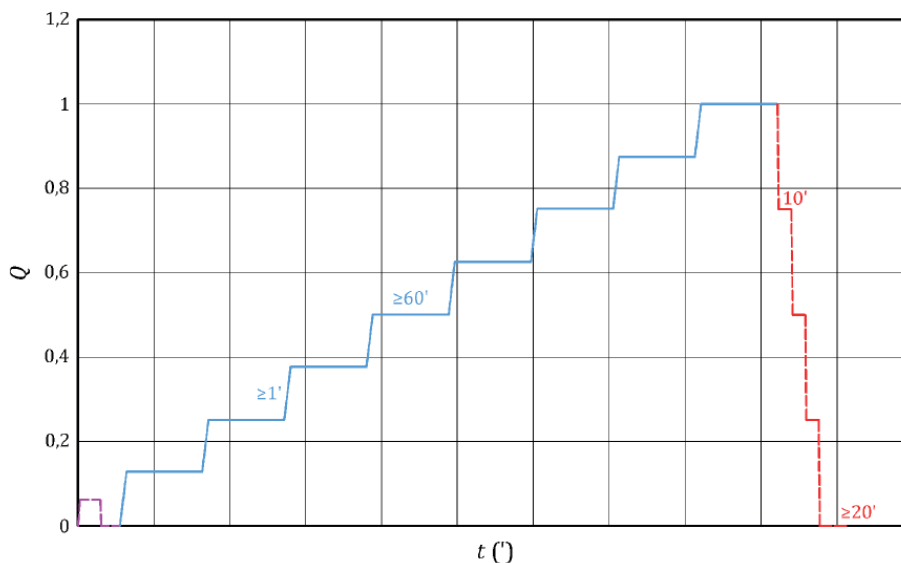


Figura 8. Secuencia de carga para ensayos de ciclo único (EN ISO 22477-1).

Los periodos de carga se prolongan hasta que la velocidad de desplazamiento del pilote es menor de 0,1 mm/20 min de acuerdo a esta norma, todavía en fase de discusión.

En ocasiones se quiere simular el comportamiento de una estructura sometida a unas acciones determinadas y se plantea un procedimiento específico. En la fotografía de la figura 9 se muestra una prueba donde se aplicaron 2910 ciclos de carga con una frecuencia de 1 ciclo/minuto. Se mantenía una carga mínima de 150 kN llegando a un máximo de 850 kN. El ciclo de carga y descarga tenía la siguiente duración: 8 segundos de incremento de carga, 2 segundos de carga máxima y 4 segundos de descarga.



Figura 9. Prueba de carga cíclica (RK)

Existen diferentes métodos para definir la carga de fallo a partir de los ensayos de carga estáticos. En general no son recomendables los métodos que no tienen en cuenta la deformación elástica del pilote, ya que sobreestiman la capacidad admisible en pilotes cortos y la subestiman en los largos. Los métodos que cuentan con la deformación elástica y están basados en criterios de fallo nos permiten una mejor comprensión del funcionamiento del pilote y nos suministran resultados más precisos.

Tanto AASHTO (2002) como la FHWA recomiendan el método de Davisson para la evaluación de la carga de fallo.

### 3.2. Ensayos de carga a tracción

Estos ensayos de carga son llevados a cabo para determinar la capacidad de carga de los pilotes a tracción axial. Esta capacidad es importante en grupos de pilotes sometidos a grandes momentos de vuelco. Por otro lado, la importancia de determinar la capacidad de carga a tracción se ha incrementado enormemente en los últimos años debido a consideraciones de diseño en la hipótesis sísmica. La mecánica básica de este ensayo es similar al de compresión excepto que la carga es aplicada en tracción.



### 3.2.1. Instrumentación y sistemas de reacción

Los movimientos en cabeza son habitualmente medidos por relojes comparadores que miden el movimiento entre la cabeza del pilote y una viga de referencia soportada independientemente como se puede ver en la fotografía de la figura 10, donde se presenta un ensayo típico a tracción sobre un pilote de reacción de una prueba de carga. Las normativas requieren para esta prueba más longitud de elongación y una mayor precisión en los dispositivos de medida que para los ensayos a compresión.



Figura 10. Instrumentación con relojes comparadores en prueba de carga a tracción (RK)

La norma ASTM D-3689 describe el método de ensayo para este tipo de prueba y presenta varios métodos alternativos para la aplicación de la carga de tracción al pilote. Normalmente, las cargas son aplicadas por un cilindro hidráulico centrado en la parte superior de una viga que empuja contra el sistema de reacción conectado al pilote a ensayar. La viga puede ser soportada por pilotes o, si las cargas son pequeñas, por elementos de reparto que transmiten la carga directamente al terreno, como se puede observar en la fotografía de la figura 11.



Figura 11. HAMILTON Wentworth School District Board North Secondary School (Canadá) (Site)

### 3.1.2. Procedimiento de carga e interpretación de los resultados

Varios procedimientos de carga son detallados en ASTM D-3689. Es recomendable que el pilote o micropilote a ensayar sea llevado a su carga de fallo, especialmente si se trata de un plan de ensayos en la fase de diseño.

A diferencia de otros ensayos, no existe un método aceptado generalmente para la determinación de la capacidad última a tracción.

Debido a la importancia creciente de este tipo de ensayos es recomendable que el alargamiento elástico del pilote y un valor de compensación sea utilizado en la interpretación de los ensayos. La FHWA sugiere un valor de 4 mm para la compensación. La carga a la que la curva de movimiento en cabeza intercepta el alargamiento elástico más 4 mm es definida como la carga de rotura a tracción. La carga de diseño a considerar se sitúa habitualmente entre un medio y dos tercios de la carga de rotura.

### 3.3. Ensayos de carga lateral

Los ensayos a carga lateral son llevados a cabo en proyectos donde los pilotes o micropilotes están sometidos a esfuerzos laterales significativos. Al igual que en los ensayos de carga a tracción, hay un interés creciente por este tipo de ensayo, especialmente por consideraciones de diseño sísmico o diseño portuario (tiro de bolardo, etc.)

#### 3.3.1. Instrumentación y sistemas de reacción

Los movimientos laterales son medidos por relojes comparadores o deflectores de cuerda vibrante que registran el movimiento entre la cabeza del pilote y una viga montada independientemente. En este tipo de ensayo es muy recomendable que la medida de la deformación lateral en profundidad sea también obtenida durante la prueba. Para ello se pueden utilizar inclinómetros embutidos en el pilote. En la fotografía de la figura 12 se presenta una posible configuración.



Figura 12. Instrumentación de prueba de carga lateral (RK)

La norma ASTM D-3966 describe algunos posibles sistemas para aplicar la carga lateral al pilote. El más habitual es la aplicación de la carga lateral mediante un cilindro hidráulico actuando entre dos pilotes. En

la fotografía de la figura 13 se muestra la configuración de una prueba de carga lateral sobre pilotes in situ.



Figura 13. Prueba de carga lateral en pilotes in situ (Terratest)

### 3.3.2. Procedimiento de carga e interpretación de los resultados

Varios procedimientos se detallan en ASTM D-3966. El procedimiento de carga estándar requiere que la carga del ensayo sea del 200% de la carga lateral de diseño.

La interpretación y análisis de los ensayos de carga lateral es mucho más complicado que los de compresión o tracción. La deformación lateral en profundidad debería ser también representada para un correcto análisis. Existen numerosos artículos con información adicional sobre métodos de análisis e interpretación de resultados.

### 3.4. Ventajas y desventajas

Los ensayos de carga estáticos permiten un diseño más racional y fiable que el obtenido a partir de las capacidades estimadas en formulaciones estáticas. Al permitirnos conocer mejor el comportamiento del sistema pilote-suelo podemos reducir los coeficientes de seguridad con el consiguiente ahorro.

Planificado convenientemente en fase de proyecto, especificando número y localización, se pueden minimizar los impactos de estas pruebas en la etapa de construcción.

No obstante, no dejan de tener un impacto importante en tiempo y coste, especialmente en obras pequeñas donde muchas veces no son viables.

Cuando el terreno es muy heterogéneo y la extensión de la obra es grande, la utilización únicamente de pruebas de carga estática puede dar lugar a lagunas de información. En estos casos es conveniente complementarlas con otro tipo de pruebas, como las dinámicas o las de carga rápida.

#### 4- Pruebas de carga dinámica

En la actualidad, el desarrollo de la informática y la electrónica aplicadas al análisis de la ecuación de onda ha permitido la toma de medidas de alta precisión de los valores de fuerza y velocidad que se desarrollan durante el impacto de la maza de hinca sobre la cabeza del pilote. De esta forma, mediante el método desarrollado por el Case Institute of Technology, Cleveland, Ohio, U.S.A., se pueden obtener la capacidad portante, las tensiones que sufre el pilote y la energía del impacto, sin las incertidumbres que se engloban bajo coeficientes de seguridad en las fórmulas de hinca o en las formulaciones estáticas. La proliferación de estas técnicas ha hecho que, hoy en día, en todo el mundo, sean el procedimiento normal de control en los trabajos de pilotaje hincado, empezando a extenderse su uso en el pilotaje in situ.

Estas pruebas han sido incorporadas en las normativas de diferentes países. La norma europea que ampara estas pruebas es la EN ISO 2247-4:2017 “Geotechnical investigation and testing – Testing of geotechnical structures – Part 4: Testing of piles: dynamic load testing”. La norma estadounidense es la ASTM D-4945 “Standard Test Method for High Strain Dynamic Testing of Piles.

##### 4.1. Instrumentación y equipo

Los métodos de control electrónico de la hinca de pilotes se basan en la medida de los valores de deformación y velocidad que se producen en la cabeza del pilote a partir del momento del impacto del martillo. Este impacto recorre toda la longitud del pilote en forma de una onda de presión cuya señal se registra mediante dos tipos de sensores: transductores de deformación y acelerómetros. En la fotografía de la figura 14 se muestran estos sensores anclados al pilote durante la prueba.



Figura 14. Sensores sobre el pilote durante la prueba (RK)

La señal obtenida por el transductor de deformación nos permite obtener la señal de fuerza:  $F=E \cdot A \cdot \epsilon$ , y la señal del acelerómetro se integra para obtener la velocidad con que se mueve la cabeza del pilote durante la prueba:  $V=\int a \cdot dt$ . En la figura 15 se muestran las curvas obtenidas en un caso real.

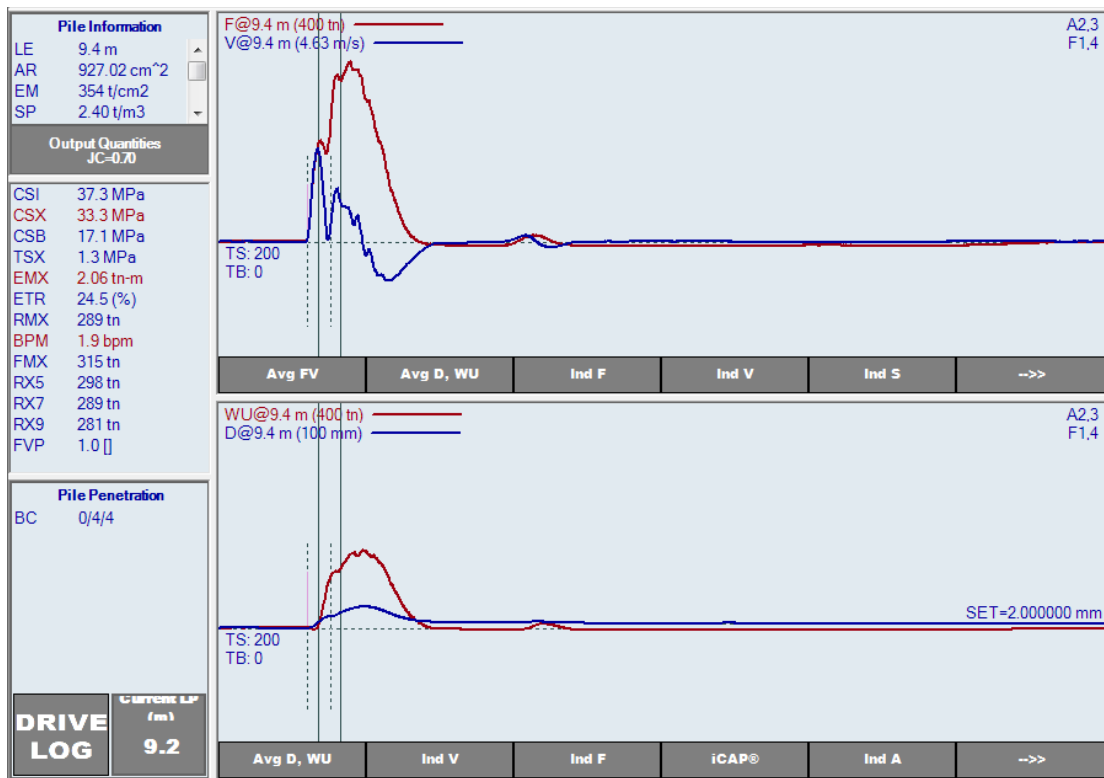


Figura 15. Ejemplo de salida gráfica de una prueba de carga dinámica.

Hoy en día, los analizadores de hinca de pilotes son equipos compactos (figura 16) que combinan todos los componentes. Durante la hinca, el PDA (Pile Driving Analyzer) lleva a cabo integraciones y todos los cálculos necesarios para analizar los registros de fuerza y velocidad con el fin de determinar la energía transferida en el impacto, las tensiones a lo largo del pilote, la integridad estructural y la capacidad del pilote.



Figura 16. Analizador de hinca de pilotes. Modelo PAX (Pile Dynamics, Inc)

#### 4.2. Metodos de interpretación

Existen dos métodos diferentes de interpretación de los registros de fuerza y velocidad obtenidos en el pilote bajo impactos de alta deformación.

El primero permite un cálculo inmediato de la capacidad portante durante la prueba (método Case), y el segundo, más riguroso, requiere la modelización matemática del pilote y el terreno y un proceso iterativo variando múltiples parámetros hasta conseguir el ajuste de la señal modelizada con la señal captada por los sensores (CAPWAP, AllWave...).

#### 4.2.1. Capacidad según el Método CASE

Los métodos directos calculan la capacidad portante como la componente estática ( $R_{stat}$ ) de la resistencia total del suelo ( $R_{tot}$ ), para lo que se requiere restarle a ésta última la componente dinámica ( $R_{dyn}$ ) que solo ocurre durante la hincada del pilote debido a los efectos de amortiguamiento e inercia:

$$R_{stat} = R_{tot} - R_{dyn}$$

La Figura 17 muestra un ejemplo de análisis por el método Case. En la parte superior, se reproducen los registros de fuerza y velocidad, ambos medidos cerca de la cabeza del pilote, como función del tiempo  $F_i(t)$  y  $v_i(t)$ .

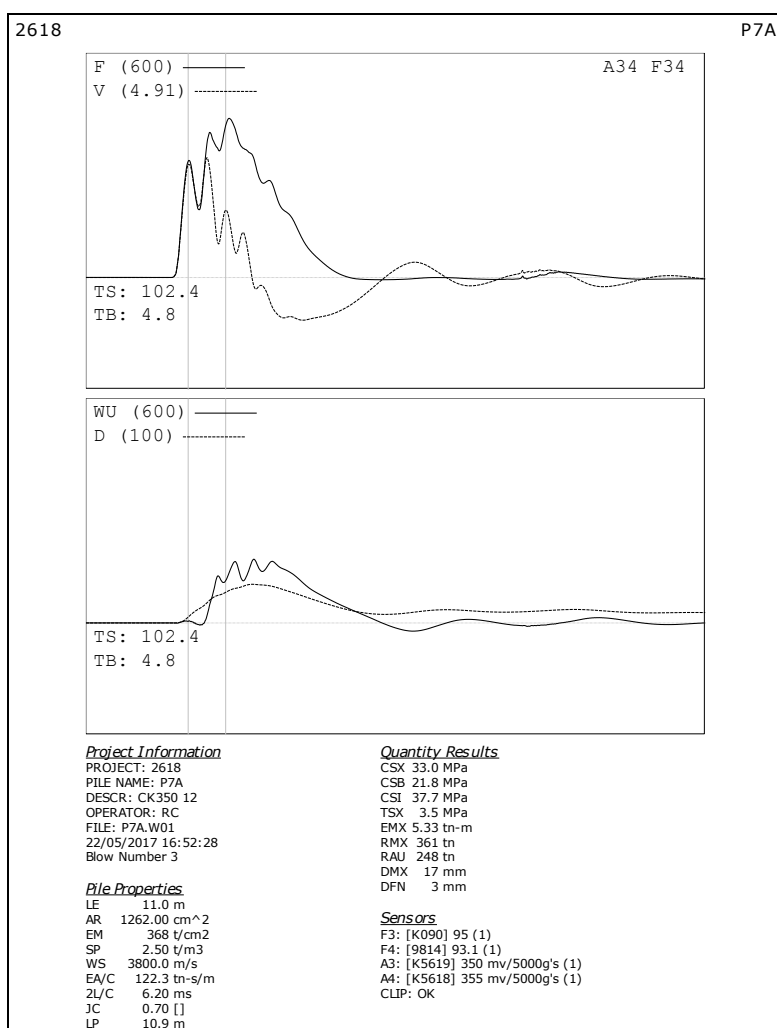


Figura 17. Curvas y resultados del método Case.

La fuerza  $F_i(t)$  en cabeza del pilote se calcula a partir de la deformación,  $\varepsilon_i(t)$ , medida por los extensómetros:

$$F_i(t) = E \cdot A \cdot \varepsilon_i(t)$$

siendo:

- E: el módulo de elasticidad dinámico del material del pilote, y
- A: el área de la sección transversal del pilote.

La velocidad se obtiene de los registros de los acelerómetros, tras integrar una vez en el tiempo. En tanto en cuanto no existen resistencias externas (resistencias por fuste) que se opongan al movimiento del pilote, o mientras no existan cambios de sección que produzcan reflexiones,  $F_t(t)$  y  $v_t(t)$  permanecen proporcionales. El factor de proporcionalidad es la impedancia mecánica del pilote que responde a la siguiente fórmula:

$$Z = \frac{E \cdot A}{c}$$

siendo:

$c$ : velocidad de la onda en el material del pilote.

Cuanto mayor diferencia se aprecia entre las curvas  $F_t(t)$  y  $v_t(t)$ , mayor es la resistencia del suelo en el fuste del pilote.

La velocidad de onda es también función de las propiedades del material del pilote y responde a la siguiente expresión:

$$c^2 = \frac{E}{\rho}$$

siendo:

$\rho$ : densidad del material del pilote.

De acuerdo con el Método Case, dada la fuerza y velocidad medida en cabeza,  $F_t(t)$  y  $v_t(t)$  (de un pilote de área  $A$ , módulo  $E$ , longitud  $L$ , y velocidad de onda del material  $c$ ), la capacidad portante del pilote en el momento del ensayo puede ser calculado a partir de la siguiente fórmula para la determinación de RMX ( $R_{stat}$ ):

$$RMX = \frac{1}{2} \{ (1 - J_c) [F_t(t_x) + Zv_t(t_x)] + (1 + J_c) [F_t(t_2) - Zv_t(t_2)] \}$$

donde  $t_x$  es elegido de tal manera que RMX es máximo, que coincide, normalmente, con el primer pico de velocidad, y  $t_2 = t_x + 2L/c$ . La impedancia del pilote es  $Z$ . El factor adimensional de amortiguamiento Case,  $J_c$ , es elegido usualmente entre 0,4 y 1,0 con valores más altos cuanto más cantidad de finos tenga el suelo.

Los rangos de variación de  $J_c$ , según el tipo de terreno se adjuntan en la Tabla 1.

| Suelo           | $J_c$<br>[-] |
|-----------------|--------------|
| Arena           | 0,05-0,20    |
| Limo arenoso    | 0,15-0,30    |
| Limo            | 0,20-0,45    |
| Arcilla arenosa | 0,40-0,70    |
| Arcilla         | 0,60-1,10    |

Tabla 1. Valores de  $J_c$  en función del tipo de terreno.

Si el factor de amortiguamiento es cero, entonces la fórmula del Método Case nos da la capacidad total:

$$R_{total} = RX0 = \frac{1}{2} \{ [F_t(t_x) + Zv_t(t_x)] + [F_t(t_2) - Zv_t(t_2)] \}$$

#### 4.2.2. Métodos basados en la modelización matemática

Los métodos basados en la modelización matemática utilizan, al igual que los métodos directos, las curvas de fuerza y velocidad registradas en la cabeza del pilote. La teoría de la onda unidimensional permite la estimación de la resistencia del suelo y el cálculo de la respuesta del pilote bajo un impacto del martillo de hinca.

La modelización de la resistencia estática del suelo consiste en un muelle elasto-plástico, mientras que la parte dinámica de la resistencia se simula por medio de un amortiguador viscoso lineal.

La resistencia de fuste se modeliza en puntos discretos a lo largo del pilote, pudiendo así permitirse una resistencia variable a distintas profundidades.

Las fuerzas de reacción del suelo son fuerzas pasivas y, hasta ahora, se ha tenido suficiente precisión al considerarlas como función exclusiva del movimiento del pilote. Se asume, además, que la reacción del suelo tiene dos componentes, una estática (elasto-plástica) y otra dinámica (amortiguamiento lineal). De esta forma el modelo del suelo puede representarse en cada punto con tres incógnitas (elasticidad, plasticidad y viscosidad).

El análisis dinámico del método CAPWAP (el más usado en el mundo) se realiza con el procedimiento introducido por Smith. Este procedimiento divide el pilote en un número discreto de masas puntuales, muelles y amortiguadores (figura 18). De esta forma, existen tres veces más incógnitas que elementos de pilote.

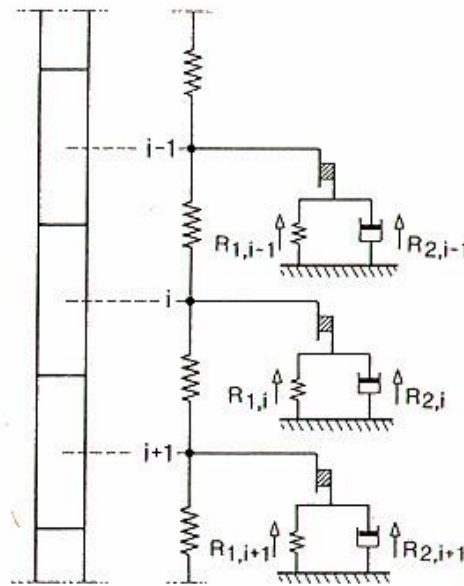


Figura 18. Modelización suelo-pilote en el método CAPWAP.

Inicialmente se asumen unos parámetros para cada elemento de suelo y se introduce el movimiento del pilote obtenido a partir del registro de aceleración en su cabeza. Los resultados que se obtienen no son solamente los movimientos del pilote y las resistencias del suelo, sino también la fuerza resultante en la cabeza del pilote. Esta fuerza puede compararse con la fuerza medida en la cabeza del mismo mediante los transductores de deformación. Normalmente estos dos registros no coinciden y es necesario seguir un procedimiento iterativo hasta que sean suficientemente aproximados el uno al otro. Para conseguirlo es necesario ir variando los parámetros del suelo en cada punto hasta que sea imposible mejorar el ajuste entre los dos registros. Los parámetros del suelo así obtenidos se consideran entonces los correctos. El resultado final del análisis CAPWAP son, por tanto, la magnitud y localización a lo largo del pilote de las resistencias estática y dinámica. La resistencia estática puede utilizarse para predecir la curva del comportamiento que tendría el pilote en el caso de una prueba de carga estática.



### 4.3. Aplicación del método a pilotes in situ y micropilotes

La aplicación del método en un pilote in situ es más complicado que en un pilote prefabricado. Los fabricantes de equipos de ensayo están ya sacando al mercado analizadores específicos para pilotes in situ, con 16 canales de toma de datos (figura 19), que permiten múltiples configuraciones en las medidas de fuerza, con cualquier combinación de extensómetros y acelerómetros acoplados al pilote, lo que mejorará la calidad de los datos obtenidos.

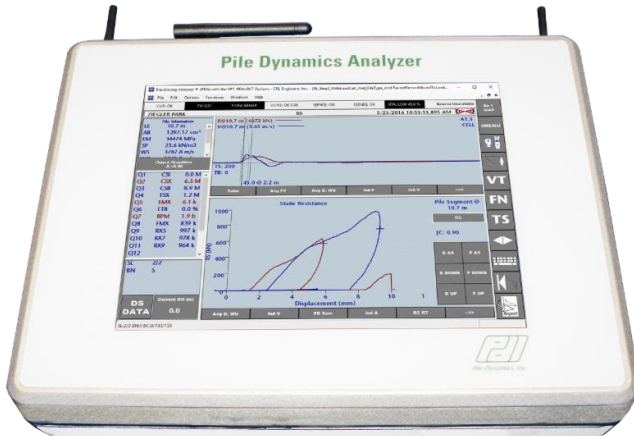


Figura 19. PDA-DLT para ensayos en pilotes in situ (Pile Dynamics, Inc.)

El pilote in situ, al no ser homogéneo, requiere siempre de un análisis CAPWAP para la determinación de su capacidad portante, donde los cambios de impedancia a lo largo del fuste son una variable importante a tener en cuenta, lo que dificulta el análisis.

En la fotografía de la figura 20 se puede ver un pilote in situ instrumentado para la realización de una prueba de carga dinámica.



Figura 20. Pilote in situ instrumentado para ensayo dinámico (Terratest)

Otra inconveniente es la necesidad de llevar a obra una maza específica para la realización de la prueba. En ocasiones se utiliza un equipo convencional de hincado de pilote prefabricado con la cabeza del pilote convenientemente preparada, como se muestra en la fotografía de la figura 21.



Figura 21. Prueba de carga dinámica sobre pilote in situ con martillo de hincia (RK)

En cualquier caso, como comentábamos anteriormente, los ensayos dinámicos en pilotes “in situ” son cada vez más empleados para predecir la resistencia estática del suelo y el comportamiento carga-asiento.

Otra posible aplicación de las pruebas de carga dinámicas es a los micropilotes.

Rodio Kronsa junto con el profesor Carlos Oteo y la Universidad de la Coruña inició en el año 2006 un programa de investigación con el fin analizar el comportamiento de los micropilotes en el ensayo de carga dinámica.

Los ensayos dinámicos fueron llevados a cabo con un martillo especialmente diseñado para su uso en micropilotes y dos acelerómetros y dos extensómetros fueron instalados en la cabeza del pilote como se observa en la fotografía de la figura 22.



Figura 22. Martillo e instrumentación en el micropilote (RK)

Un análisis CAPWAP fue realizado en cada uno de los golpes obteniendo los resultados que se adjuntan en la gráfica de la figura 23.

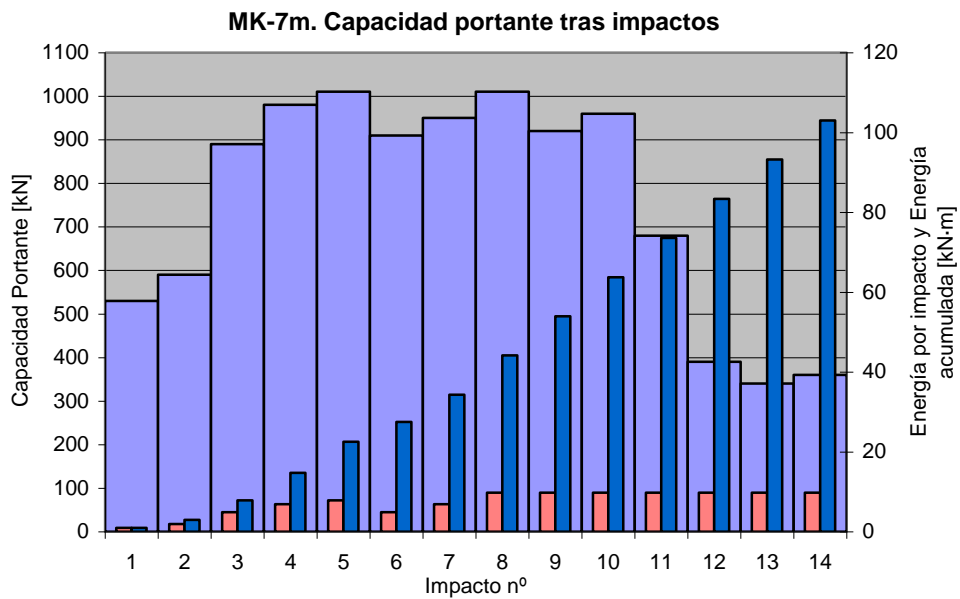


Figura 23. Capacidad portante movilizada en el análisis CAPWAP

Posteriormente y a escasos metros de distancia se ejecutó un micropilote con las mismas características del pilote ensayado dinámicamente y se realizó una prueba de carga estática sobre el mismo, como se puede ver en la fotografía de la figura 24.



Figura 24. Prueba de carga estática sobre micropilote (RK)

La curva carga-asiento resultante en la prueba se puede ver en la gráfica de la figura 25.

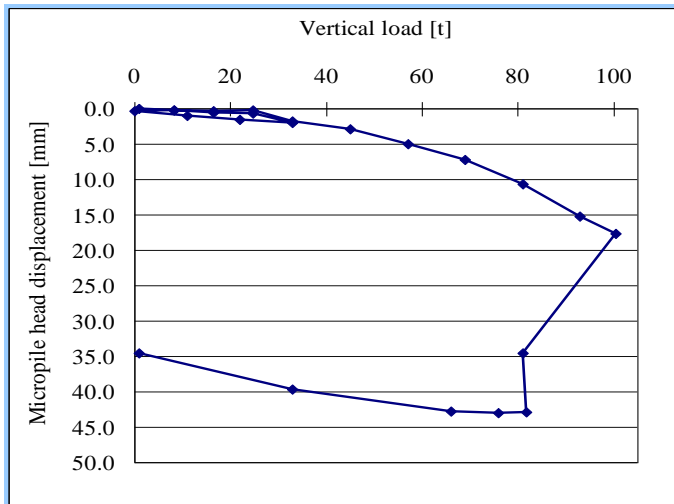


Figura 25. Curva carga-asiento en el micropilote.

Las pruebas demostraron el potencial de los ensayos de carga dinámicos como una valiosa herramienta para la evaluación del comportamiento de los micropilotes.

Desde entonces, Rodio Kronsa ha realizado pruebas de carga dinámicas en varias obras (figura 26) y, si bien, todavía es necesario más correlaciones con pruebas de carga estáticas, estamos ante un camino prometedor.



Figura 26. Prueba de carga dinámica sobre micropilote (RK)

#### 4.4. Ventajas y desventajas

Los ensayos dinámicos pueden suministrar información del proceso de hinca completo si instrumentamos los pilotes durante la hinca. Los resultados de los ensayos pueden ser utilizados para estimar la capacidad del pilote, comprobar el martillo y el funcionamiento del sistema de hinca, monitorizar las tensiones durante la hinca y evaluar la integridad estructural del pilote.

En un día se pueden llegar a ensayar un número significativo de pilotes hincados (más de 15). En pilotes in situ, el proceso es más laborioso y depende del tipo de martillo que se utilice. De todas formas, las pruebas de carga dinámicas son un método de ensayo económico y rápido. Este método requiere entre el 1 y el 2 % de la carga aplicada en un ensayo de carga estática

En grandes proyectos, los ensayos de carga dinámicos pueden ser utilizados para complementar los ensayos de carga estática o reducir su número. En pequeños o medianos proyectos donde los ensayos de carga estática son difíciles de justificar económicamente, los ensayos de carga dinámicos ofrecen un método de control muy útil y viable.

La información que suministran las pruebas puede utilizarse en fase de diseño para optimizar las longitudes, siempre que exista una planificación de ensayos en las etapas iniciales de la construcción.

En terreno complicados donde se espera un comportamiento errático de la hinca con problemas de daños en los pilotes, los ensayos dinámicos ofrecen un rápido y económico método de afrontar esos problemas.

Una de las desventajas que presenta el ensayo dinámico para determinar la capacidad portante última del pilote es que requiere que el sistema de hinca movilice toda la resistencia actuante. La resistencia por fuste puede ser generalmente movilizad con una fracción del movimiento requerido para movilizar la resistencia por punta. En ciertas condiciones, es difícil movilizar por completo esta resistencia en punta lo que produce una subestimación de la capacidad portante final.

Los ensayos de carga dinámicos determinan la capacidad del pilote en el momento del ensayo. Debido a procesos de consolidación o relajación que pueden incrementar o reducir la capacidad portante con el tiempo, los ensayos deben realizarse con un apropiado tiempo de espera para una mejor estimación de la capacidad a largo plazo del pilote. Esto puede requerir una movilización adicional del equipo de hinca o tiempos de espera en la obra.

Los pilotes de gran diámetro tubulares abiertos o pilotes en H pueden comportarse de manera muy diferente bajo condiciones de carga estática o dinámica. Esto es particularmente cierto si el tapón no se forma durante la hinca. En estos casos, la capacidad en punta es desarrollada parcialmente durante el ensayo dinámico. Sin embargo, en condiciones de carga estática, mucho más lenta, estas secciones pueden desarrollar el tapón y dar lugar a capacidades portantes mayores.

## **5- Prueba de carga bidireccional**

Como hemos visto, en un ensayo de carga estática convencional el pilote es comprimido en cabeza usando un sistema de reacción o cargas muertas. Las resistencias por fuste y punta se oponen a la carga aplicada en cabeza.

En la prueba de carga bidireccional, el pilote también es cargado en compresión, pero la carga es aplicada en la punta del pilote o cerca de ella, en vez de en la cabeza. Cuando la célula se expande, la resistencia en punta provee la reacción necesaria a la resistencia por fuste, y viceversa. El ensayo se completa bien cuando la última resistencia en fuste o en punta es alcanzada, bien cuando la célula alcanza su capacidad de carga.

Un ensayo con célula Osterberg separa automáticamente la resistencia por fuste y punta. En este ensayo, uno de los componentes falla para una carga determinada. En cambio, en un ensayo convencional, se requiere que fallen ambos componentes, lo que supondría superar el doble de la carga aplicada en la célula. Por tanto, la carga colocada en la punta del pilote es siempre el doble de efectiva que la misma carga colocada en la cabeza del pilote.

Cuando el pilote es de gran diámetro y las cargas solicitadas son elevadas, se pueden instalar varias células en el mismo nivel de prueba, lo que permite incrementar la carga en el ensayo. Si se busca discretizar la resistencia por segmentos, se pueden colocar las células en varios niveles como en el esquema de la figura 27.

## ESQUEMA DE PILOTE

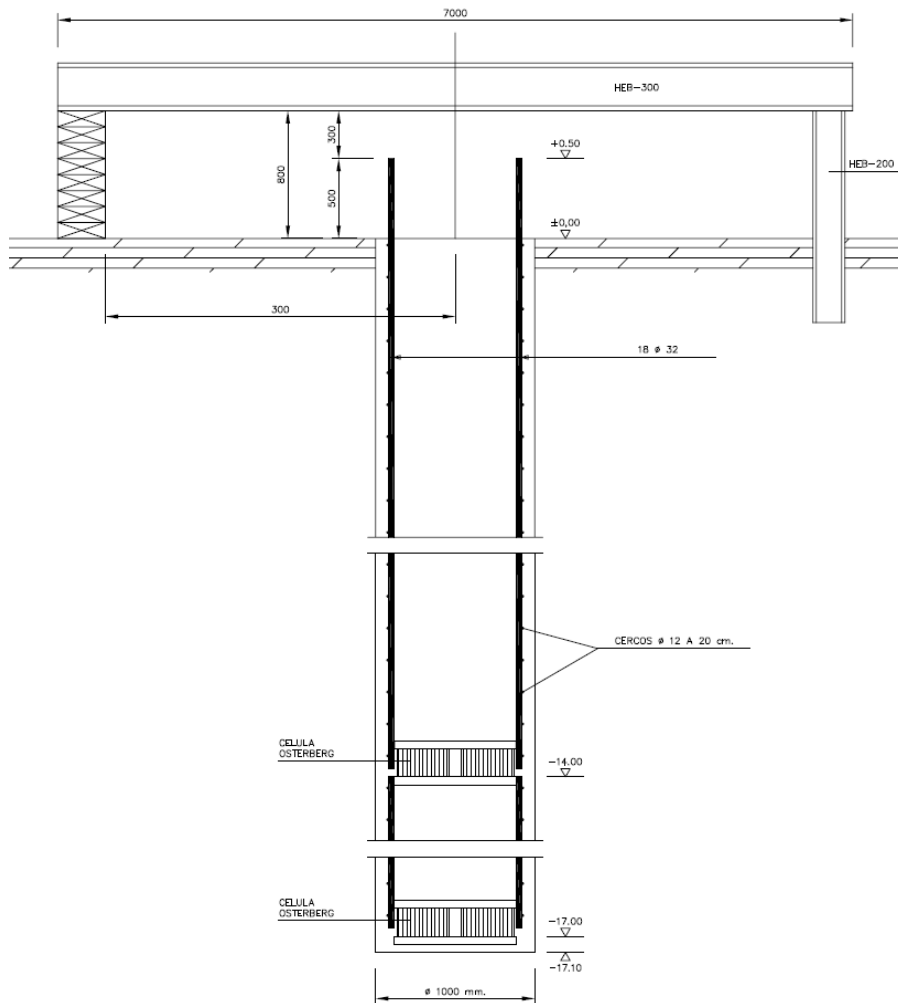


Figura 27. Esquema del pilote con dos células Osterberg.

### 5.1. Interpretación de resultados

La célula Osterberg transmite la carga al pilote en compresión de forma similar a una prueba de carga estática convencional. Los datos obtenidos en la prueba de carga bidireccional son, por tanto, analizados de forma parecida. La única diferencia significativa es que la célula Osterberg suministra dos curvas carga-asiento, una para la resistencia por fuste y otra para la resistencia en punta. El movimiento del fuste hacia arriba es determinado añadiendo a la compresión medida del pilote (movimiento de la parte superior de la célula) el movimiento del pilote registrado en cabeza. El movimiento del pilote en punta es determinado sustrayendo al movimiento de cabeza del pilote la medida de la placa inferior. La carga de fallo para cada componente se puede determinar de estas curvas usando un criterio de fallo similar a los recomendados para las pruebas de carga convencionales. Para determinar la resistencia por fuste del pilote, el peso del pilote debe ser sustraído de la carga ascendente transmitido por la célula.

### 5.2. Ventajas y desventajas

Al no requerir un sistema de reacción a nivel del terreno se incrementa notablemente la seguridad en este tipo de ensayos. Por otro lado, al no existir ni anclajes, ni pilotes de reacción, ni contrapesos, la influencia de estos elementos es eliminada. Además, el área de trabajo requerida es enormemente reducida en comparación con cualquier otro sistema de carga estática.

En cuanto a costes, la prueba de carga bidireccional es cada vez más interesante conforme la carga se incrementa, a diferencia del ensayo estático convencional.

Los ensayos pueden ser diseñados para separar los pilotes de prueba en dos o tres secciones, obteniendo automáticamente la reacción de cada componente. En la fotografía de la figura 28 se pueden ver dos células Osterberg colocadas en la armadura del pilote antes de introducirla en la perforación. También nos permite realizar ensayos adicionales en el mismo pilote en intervalos de tiempo seleccionados después de la hincada, para el caso de pilotes hincados, permitiendo cuantificar los efectos de consolidación alrededor del fuste.

Se trata de un método especialmente interesante en situaciones mar adentro, si bien es una buena herramienta de análisis del comportamiento del pilote en cualquier caso.



Figura 28. Armadura de pilote con dos células Osterberg (RK)

En cuanto a las desventajas, cabe destacar que no es posible su utilización en ciertos tipos de pilotes como los pilotes metálicos en H, pilotes de madera o pilotes tubulares. Tiene que ser planificado con antelación ya que este ensayo no puede ser llevado a cabo después de la ejecución de los pilotes.

Por otro lado, el ensayo bidireccional alcanza la carga última en sólo una de las dos componentes de resistencia y la capacidad del pilote comprobada por el ensayo está limitada a dos veces la componente que falle. Además, una vez instalada, la capacidad de la célula no puede ser incrementada si esta es insuficiente.

Por último, aunque una curva carga-asiento equivalente al ensayo convencional puede ser obtenida a partir de los datos del ensayo bidireccional, no es una medida directa y puede llegar a ser demasiado conservadora.

## 6- Ensayos de carga rápida

Como se dijo anteriormente, los ensayos de carga rápida usan o un cilindro de combustión interna con unos contrapesos de reacción, o una maza de caída libre sobre sistemas de amortiguación. El método que utiliza el cilindro de combustión interna es conocido como método Statnamic cuyo uso está más extendido en EEUU y Canadá. En Europa, Japón o sudeste de Asia se van imponiendo otros dispositivos que no necesitan combustible para aplicar la carga como el StatRapid de la empresa Allnamics.

El método Statnamic, desarrollado en 1988 por Berminghammer Foundation Equipment y TNO Building and Construction Research de Holanda, está basado en el lanzamiento hacia arriba de una masa de reacción desde la cabeza del pilote. Este lanzamiento se produce al generarse altas presiones en un cilindro, debido a la ignición de un combustible especial. Como reacción al lanzamiento de la masa, el pilote es empujado hacia el interior del suelo (figura 29).



Figura 29. Lanzamiento de la masa hacia arriba como consecuencia de la ignición.

En el método StatRapid de Allnamics, la carga se aplica mediante una maza de masa modulable con caída libre que se puede regular en altura. Esta maza impacta sobre un sistema de amortiguación formado por prismas de caucho (figura 30). La medida de la carga aplicada se realiza mediante células de carga, y la medida del desplazamiento de la cabeza del pilote mediante acelerómetros y un nivel óptico automático.





Figura 30. Lanzamiento de la masa por caída libre sobre el pilote.

Estos métodos para pruebas de carga rápida están amparados por la norma europea EN ISO 22477-10:20016 “Geotechnical investigation and testing – Testing of geotechnical structures – Part 10: Testing of piles: rapid load testing” y por la norma estadounidense ASTM D7383-10 “Standard Test Methods for Axial Compressive Force Pulse (Rapid) Testing of Deep Foundations”.

### 6.1. Análisis e interpretación de los resultados

Los resultados de estos métodos toman la forma de una curva carga-asiento de un “ensayo de carga estático equivalente” después de la extracción de los efectos de carga dinámicos.

En efecto, las correlaciones iniciales de ensayos Statnámicos con ensayos de carga estática en pilotes trabajando fundamentalmente por punta en roca, mostraron una buena concordancia sin necesidad de ajustar los resultados de la curva carga-asiento obtenida directamente del ensayo. Sin embargo, algunos ensayos posteriores demostraron que Statnamic presentaba una mayor resistencia última en algunos suelos, debido a los efectos de carga dinámicos. Con el tiempo, varios procedimientos de análisis han sido desarrollados para obtener la capacidad estática a partir de los resultados del ensayo de carga rápida. Estos métodos dependen de la longitud y repuesta del pilote y ajustan la capacidad de carga obtenida con un factor derivado del efecto de la velocidad.

Dos tipos principales de análisis de los datos de campo puede ser empleados: el método del punto de descarga (UPM) y un procedimiento no lineal dependiente del suelo.

El UPM identifica el punto donde el pilote tiene velocidad cero (punto de descarga) y asume que la resistencia del pilote en este punto es equivalente a la resistencia estática del pilote. Considerando la resistencia del pilote entre el pico de carga aplicada y el punto de descarga, se determina un factor de amortiguamiento que es utilizado para eliminar la componente dependiente de la velocidad en el ensayo de carga rápida (figura 31). Hay otras variantes del UPM tales como el método del punto de descarga modificado (MUPM) y el método segmentario del punto de descarga (SUPM). Estos métodos fueron desarrollados para pilotes largos (<40 m) o pilotes empotrados en roca y requieren instrumentación interna.

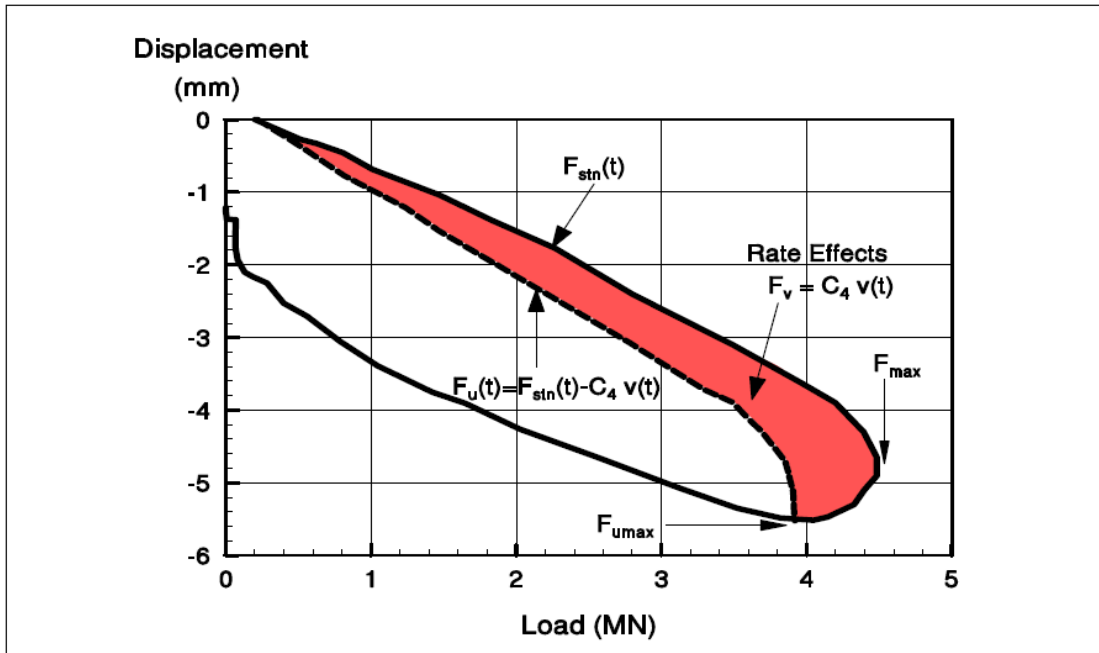


Figura 31. Curva carga-asiento a partir del método UPM. (Berminghammer Foundation Equipment)

Para pilotes flotantes en arcillas, la capacidad portante puede ser estimada usando una relación no lineal dependiente de la velocidad tal como propone Randolph (2003), que tiene su origen en el análisis de la ecuación de onda de Smith. Este enfoque requiere factores de amortiguamiento específicos para el suelo que pueden ser obtenidos de ensayos de laboratorio a alta velocidad o del análisis de ensayos previos de carga rápida.

## 6.2. Ventajas y desventajas

Las ventajas de los ensayos de carga rápida incluyen un menor costo, un tiempo de ensayo más corto y una mayor movilidad que un ensayo de carga estática equivalente.

Una vez que el equipo ha sido movilizado a la obra, varios ensayos pueden ser normalmente realizados en un día. Este método requiere entre el 5 y el 10 % de la carga aplicada en un ensayo de carga estática.

Una de las desventajas de los ensayos de carga rápida es el hecho de que los efectos dinámicos requieren de especial atención en todos los terrenos. Las correlaciones con ensayos de carga estática convencional no son todavía suficientes para evaluar con precisión este punto y el método de interpretación no es sencillo.

Por último, no debemos olvidar que para asegurar que la resistencia última ha sido alcanzada, la fuerza suministrada en el ensayo debe ser mayor que las resistencias estática y dinámica combinadas.

## **Bibliografía**

- (1) Hannigan, P.J., Goble, G.G., Likins, G.E. and Rausche F. (2006). “Design and Construction of Driven Pile Foundations - Volume II”. Federal Highway Administration. US Department of Transportation. Washington, D.C.
- (2) Poulos, HG., (2000). “Pile load test methods applications and limitations”. Libro homenaje a J. A. Jiménez Salas. Ministerio de Fomento, CEDEX y Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica, Madrid.
- (3) Van Ginneken, G., Middendorp, P., Fernández Tadeo, C.. “Un nuevo método rápido de ensayos de carga en pilotes: STATNAMIC. Principios y utilización en Europa”. Disponible en: <http://www.fernandeztadeo.com>.
- (4) American Society for Testing and Materials. “Standard Test Method for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load”, ASTM D 1143M-07.
- (5) American Society for Testing and Materials. “Standard Test Method for High Strain Dynamic Testing of Piles”, ASTM D4945-07.
- (6) American Society for Testing and Materials. “Standard Test Method for Individual Piles Under Static Axial Tensile Load”, ASTM D3689-90.
- (7) American Society for Testing and Materials. “Standard Test Method for Deep Foundations Under Lateral Load”, ASTM D3966-07.
- (8) American Society for Testing and Materials. “Standard Test Method for Axial Compressive Force Pulse Testing of Deep Foundations”, ASTM D7383-10.
- (9) EN ISO 22477-1:2017 “Geotechnical investigation and testing – Testing of geotechnical structures – Part 1: Pile load test by static axially loaded compression”, ISO 2017. (en fase de discusión)
- (10) EN ISO 2247-4:2017 “Geotechnical investigation and testing – Testing of geotechnical structures – Part 4: Testing of piles: dynamic load testing”, ISO 2017 (en fase de edición).
- (11) EN ISO 22477-10:2016 “Geotechnical investigation and testing – Testing of geotechnical structures – Part 10: Testing of piles: rapid load testing”, ISO 2016.
- (12) CAPWAP Manual (2006). Pile Dynamics Inc. Cleveland, Ohio.
- (13) Código Técnico de la Edificación (CTE), Documento Básico SE-C: Seguridad Estructural, Cimientos. Ministerio de la Vivienda (2006).
- (14) “Guía de cimentaciones en obras de carreteras”. Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento (2003).
- (15) “Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias” (ROM 0.5-05), Puertos del Estado, Ministerio de Fomento (2005).
- (16) Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales, Norma UNE-EN 1997-1.