

Pruebas de carga de pilotes. Métodos, precisión y contrastes

Carlos Fernández Tadeo¹
CFT & Asociados

Tema 3: Ingeniería geotécnica y desarrollo sostenible

RESUMEN

Las pruebas de carga de pilotes se realizan para comprobar que estos tienen la capacidad requerida para soportar la estructura a construir y que su comportamiento en servicio será adecuado. Tradicionalmente, se han realizado por el método estático (SLT), aplicando una fuerza vertical de compresión en la cabeza del pilote que trata de movilizar la resistencia del terreno. Hace medio siglo nacieron las pruebas de carga dinámica (DLT), que aprovechan la energía de los martillos de hincas para aplicar la carga de prueba en los pilotes hincados. Otra alternativa más reciente es el método rápido (RLT), en el que la carga se aplica al pilote mediante un dispositivo de impacto con suficiente amortiguación para que no se genere una onda de tensión, lo que lo convierte en un método más parecido al estático.

Las pruebas de carga de pilotes se utilizan cada vez más como método principal de diseño del pilotaje en los proyectos grandes. Los códigos de diseño de pilotes recomiendan contrastar las pruebas DLT y RLT con pruebas estáticas SLT, pero no es tan sencillo ni directo. Se deben tener en cuenta algunos factores importantes que influyen en el resultado de las pruebas. Los contrastes entre pruebas DLT (o RLT) y SLT no tienen por qué ser una norma, sino simplemente una oportunidad más de obtener información relevante sobre el comportamiento de los pilotes de nuestro proyecto. Lo importante es hacer pruebas de carga sobre los pilotes para comprobar su comportamiento real ante las cargas de diseño, dadas las incertidumbres que dejan otros métodos de cálculo. Los métodos de prueba a utilizar en cada caso podrán elegirse en función de las circunstancias particulares de cada proyecto y de la disponibilidad de equipos de prueba.

Palabras clave: prueba de carga, pilote, prueba estática, prueba dinámica, prueba rápida, diseño.

¹ Carlos Fernández Tadeo, info@fernandeztadeo.com, CFT & Asociados, Barcelona (España).

1 INTRODUCCIÓN

Las pruebas de carga de pilotes se realizan para comprobar que estos tienen la capacidad requerida para soportar la estructura a construir y que su comportamiento en servicio será adecuado. Tradicionalmente, se han realizado por el método estático (SLT – Static Load Test), aplicando una fuerza vertical en la cabeza del pilote que trata de movilizar la resistencia del terreno. Hace medio siglo nacieron las pruebas de carga dinámica (DLT – Dynamic Load Test), que aprovechan la energía de los martillos de hincia para aplicar la carga de prueba en los pilotes hincados. Otra alternativa más reciente es el método rápido (RLT - Rapid Load Test), en el que la carga se aplica al pilote mediante un dispositivo de impacto amortiguado.

Las pruebas de carga de pilotes se están utilizando como método principal de diseño del pilotaje en los proyectos grandes. Ya se han aprobado normas europeas para los tres métodos de prueba citados, por lo que su utilización se va a extender en el diseño de las cimentaciones profundas en los próximos años, lo que está generando muchos interrogantes entre los ingenieros geotécnicos.

2 COMPORTAMIENTO DEL PILOTE EN LA PRUEBA Y EN LA CIMENTACIÓN

En general, para que las pruebas de carga sean útiles, se requiere que cumplan los siguientes requisitos (Poulos, 2000):

- La carga de prueba se aplica sobre el pilote de la misma forma en que lo hará la estructura.
- El dispositivo de prueba no introduce en el suelo cambios tensionales o efectos laterales inapropiados.
- La disposición de la prueba no introduce imprecisiones en la medición de los asentamientos o las deformaciones laterales.
- El dispositivo de prueba permite la medición de la carga de prueba con exactitud.
- La duración de la aplicación de la carga de prueba es similar a la que serán sometidos los pilotes en servicio.

Resulta muy poco probable que un plan de pruebas de carga en un proyecto determinado llegue en la realidad a cumplir todos los requisitos anteriores simultáneamente.

Las normas de ensayo de pruebas SLT exigen unas determinadas condiciones geométricas para el dispositivo de prueba y unos procedimientos a seguir en el proceso de carga y descarga, al objeto de asegurar un grado mínimo de cumplimiento del máximo número de estos requisitos. Un ejemplo es la Figura 1, obtenida de la norma UNE-EN-ISO 22477-1:2019, donde se exponen requisitos para varios dispositivos de prueba SLT: a) contrapesos, b) y c) pilotes o micropilotes de tracción, d) y e) anclajes al terreno.

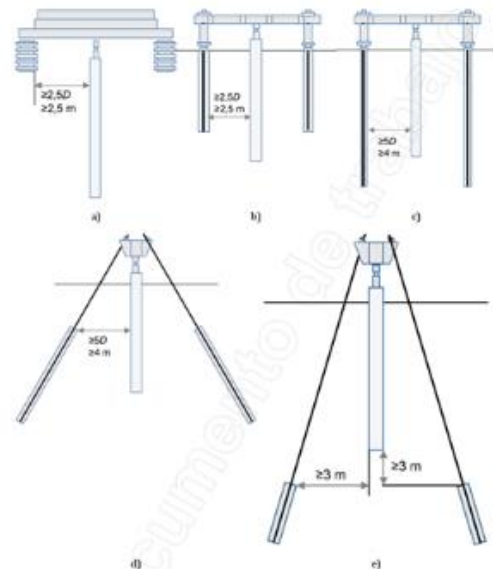


Figura 1. Sistemas de reacción para pruebas estáticas a compresión (fuente: UNE-EN ISO 22477-1:2019)

El dispositivo “ideal” sería uno con una carga vertical de compresión que no necesitara ninguna de estas reacciones, ya que éstas actúan también sobre el terreno e interfieren por tanto con el comportamiento del pilote sometido a prueba.

Otra fuente potencial de inexactitud en las pruebas SLT está relacionada con las vigas de referencia para la medida del asentamiento del pilote durante la prueba. Cuando los apoyos de estas vigas se encuentran muy próximos al pilote de prueba, tienden a moverse hacia abajo siguiendo

los asentamientos del pilote de prueba, por lo que los asentamientos medidos suelen estar infraestimados. En la Figura 2 se observa un croquis habitual de la disposición de una prueba de carga estática vertical a compresión en planta y en alzado.

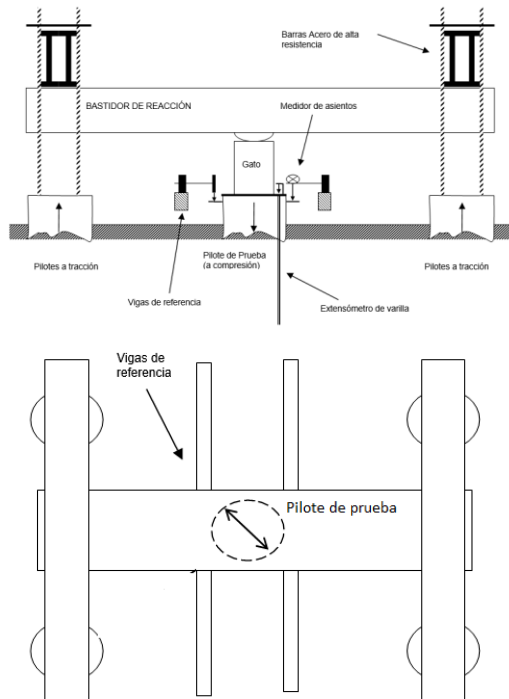


Figura 2. Croquis de disposición de una prueba estática vertical a compresión, en alzado y en planta (fuente: elaboración propia)



Figura 3. Dispositivo para una prueba SLT de 10 MN (1000 t) (fuente: propia)

En la Figura 3 se puede ver un bastidor utilizado en una prueba de 10 MN (1000 t), con la viga principal apoyada para el montaje sobre unos dados de hormigón y las vigas transversales con sus extremos anclados a cuatro pilotes de reacción mediante barras roscadas de alta resistencia. Por encima del suelo se ven las dos vigas de referencia para medición de los asentamientos del pilote de prueba.

3 DETERMINACIÓN DE LA CARGA DE HUNDIMIENTO EN UNA PRUEBA ESTÁTICA

Dado que un pilote es usualmente más resistente que el suelo en el que está embebido, el fallo por hundimiento se alcanza cuando se produce un asentamiento rápido bajo carga mantenida uniforme. Hay casos muy evidentes, como la curva carga - asiento de la prueba a compresión vertical del micropilote de la Figura 4, en la que se alcanzó una carga máxima de unas 100 t y luego el micro siguió asentando, estabilizándose la carga a unas 80 t. En este caso, está claro que la carga de hundimiento es 100 t (1 MN).

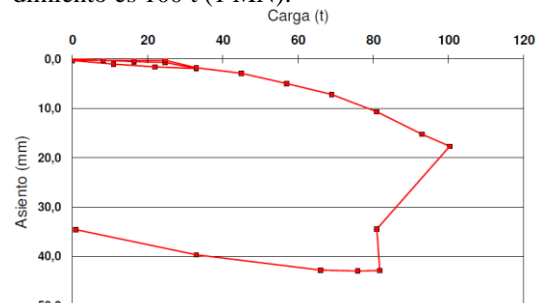


Figura 4. Gráfico carga-asiento de la prueba estática de un micropilote (fuente: elaboración propia)

Pero este no es el caso más normal en una prueba SLT. Lo usual es que al aumentar la carga el asentamiento también se incremente progresivamente, sin producirse un punto de hundimiento claro, como se ve en el gráfico carga-asiento de una prueba estática real de la Figura 5. En estos casos más habituales la determinación de la carga de hundimiento del pilote no resulta evidente y existen muchos criterios diferentes para estimarla. Uno muy simplista y difundido es definir la carga de hundimiento de un pilote como aquella para la

que el asiento excede de un determinado valor, que suele ser el 10% del diámetro de la base del pilote. Esta definición no tiene en cuenta el acortamiento elástico del pilote, que puede ser significativo en pilotes largos pero insignificante en pilotes cortos.

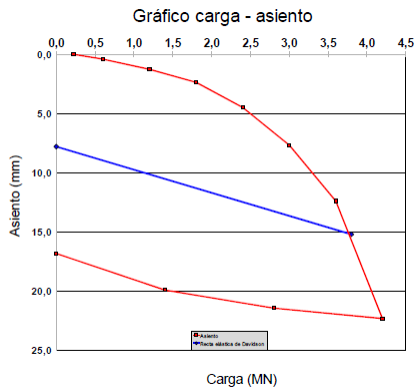


Figura 5. Gráfico carga-asiento de una prueba SLT de un pilote prefabricado hincado (fuente: elaboración propia)

Hay otros criterios modernos más completos, ya que tienen en cuenta las propiedades del pilote y su comportamiento en la prueba. Uno de estos criterios es el de Davisson (Fellenius, 1990), muy difundido en Norteamérica. Según este criterio, la carga de hundimiento del pilote se define como el punto en el que la curva carga-asiento obtenida en la prueba cruza con la recta elástica del pilote, supuestamente aislado y trabajando como columna, que tiene como origen un asiento inicial de $4 \text{ mm} + b/120$, siendo b el diámetro equivalente del pilote, y como pendiente EA/L , siendo E el módulo elástico del pilote, A su sección transversal, y L su longitud. En la misma Figura 5 se puede ver la aplicación de este criterio, donde el segmento azul es la curva elástica del pilote. En este caso, se trataba de un pilote prefabricado de sección $40 \times 40 \text{ cm}$, lo que significa un diámetro equivalente en pilote circular de $46,2 \text{ cm}$. La carga de hundimiento obtenida con esta construcción gráfica para este pilote es de $3,8 \text{ MN}$.

El segundo de estos criterios modernos para determinar la carga de hundimiento es el que aparece en la norma UNE-EN ISO 22477-1:2019, que define la carga de fluencia como aquella a la que el pilote empieza a tener asientos que no estabilizan bien bajo carga mantenida. Para determinar esta

carga de fluencia, se calcula un factor de fluencia α en cada escalón de carga, definido así:

$$\alpha = \frac{s_2 - s_1}{\log(t_2 - t_1)}$$

siendo:

- s_1 asiento en tiempo t_1
- s_2 asiento en tiempo t_2
- t_1 inicio del intervalo de tiempo
- t_2 final del intervalo de tiempo

Si en la prueba de la Figura 6 se dibuja esa evolución de asientos para cada escalón en función del tiempo en escala logarítmica, tenemos las curvas de la Figura 6, cuyas pendientes son el Factor de Fluencia de cada escalón.

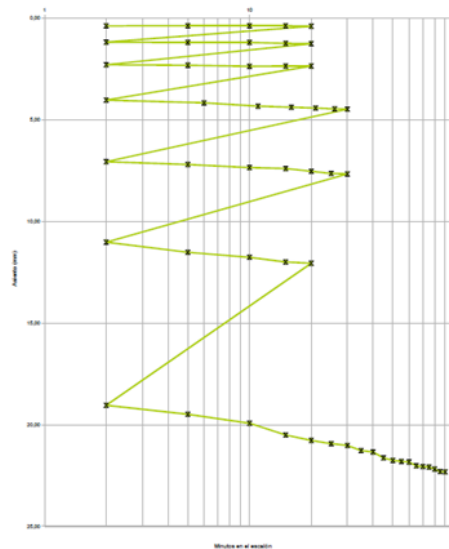


Figura 6. Evolución de asientos (mm) en cada escalón de carga en función del tiempo (minutos) (fuente: elaboración propia)

La carga de fluencia se determina utilizando el gráfico Carga – Factor de Fluencia (línea roja de la Figura 7). El punto de máxima curvatura de esta línea, o el punto de corte entre las asíntotas de su tramo inicial y del final (segmentos en negro) indica la carga de fluencia.

En España se utilizan tres códigos geotécnicos diferentes. Veamos lo que éstos dicen al respecto.

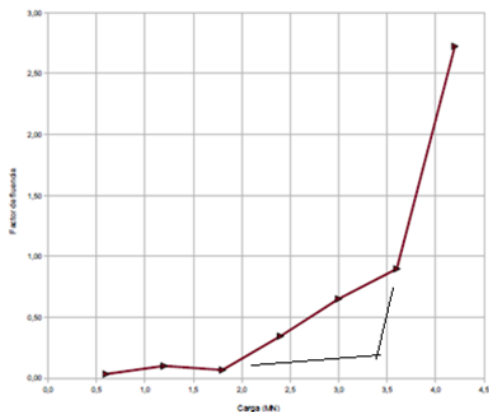


Figura 7. Factor de fluencia para cada escalón de carga (fuente: elaboración propia)

El Código Técnico de la Edificación (CTE) dice que se produce el hundimiento “cuando la carga vertical sobre la cabeza del pilote supere la resistencia del terreno causando asientos desproporcionados”, lo que deja la definición de la carga de hundimiento del pilote en manos de los responsables técnicos del proyecto, pudiendo haber criterios diferentes sobre lo que se considera “desproporcionado”.

Las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas de Puertos del Estado Español (ROM 0.5-05) dicen que se produce el hundimiento del pilote con descensos de su cabeza “iguales o superiores al 10% de su diámetro”. En el caso de la prueba de la Figura 5, el 10% del diámetro equivalente son 46,2 mm, y en la curva carga-asiento comprobamos que se llegó a 4,2 MN de carga máxima en la prueba sin alcanzar el criterio.

La Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras del Ministerio de Fomento (GCOC) dice que se produce el hundimiento “cuando las cargas verticales agotan la resistencia del terreno a compresión”, por lo que la determinación del punto en que la resistencia del terreno “se agota” queda al criterio subjetivo de quien interprete la prueba.

Como consecuencia de lo anteriormente expuesto, se puede afirmar que no hay una respuesta única a la cuestión de cuál es la carga de hundimiento del pilote tras realizar una prueba de carga estática a compresión. En el caso real anterior:

- El criterio de ROM 0.5-05 dice que la prueba no alcanzó el hundimiento, por lo

que la carga de hundimiento sería $> 4,2$ MN.

- Otros códigos geotécnicos españoles no definen un método preciso para obtener la carga de hundimiento.
- El criterio norteamericano de Davisson da una carga de hundimiento de 3,8 MN.
- El criterio de UNE-EN-ISO 22477-1:2019 da una carga de hundimiento de 3,4 MN.

4 LAS PRUEBAS DINÁMICAS Y LAS RÁPIDAS

En pilotes hincados, las pruebas DLT resultan mucho más económicas y fáciles de ejecutar que las SLT. Se desarrollaron hace décadas para pilotes hincados, puesto que el dispositivo de aplicación de la carga suele ser el mismo martillo de hinca que está en obra realizando la instalación de los pilotes. Se dan golpes al pilote con el martillo, movilizándolo su resistencia por fuste y punta, y captando las ondas generadas en el pilote mediante acelerómetros y medidores de deformación (Figura 8).



Figura 8. Sensores de medida de fuerza y velocidad en una prueba dinámica (fuente: propia)

Las curvas de fuerza y velocidad captadas por la instrumentación durante la prueba permiten realizar unos cálculos simplificados de resistencia del pilote, y luego unos cálculos más complejos con un modelo matemático informatizado, modificándose los parámetros del modelo hasta conseguir que la curva de fuerza se ajuste lo más posible a la real obtenida en el golpe de prueba.

Conviene conocer algunos aspectos importantes referentes a las pruebas DLT, a la hora de evaluar los resultados obtenidos. El primero de ellos es el tiempo transcurrido desde la hinca del pilote hasta su prueba. El avance del pilote en la hinca

va produciendo la rotura del suelo, lo que implica que al finalizar la hinca el pilote tiene menor resistencia que la que tendrá al cabo de un tiempo, cuando el suelo haya recuperado sus propiedades resistentes («setup» en inglés). Por ello, se suele dejar transcurrir un cierto tiempo desde la hinca hasta la realización de la prueba DLT.

El segundo aspecto importante que considerar en las pruebas DLT es que su resultado depende de la energía aplicada por el impacto del martillo en la prueba. Es decir, si el golpe es flojo, la resistencia del pilote movilizada en la prueba será pequeña. Y si el golpe es fuerte, la resistencia movilizada puede ser superior.

El tercer aspecto importante es el componente subjetivo que tienen las pruebas DLT. Es decir, operadores diferentes trabajando con el mismo software de análisis numérico sobre un mismo fichero de datos tomado en una prueba pueden obtener resultados de resistencia muy diferentes, hasta un 40% o más. El motivo es que los modelos matemáticos que contienen los programas de análisis son bastante complejos, con decenas de parámetros que el operador puede modificar para ajustar lo más posible el modelo a los datos reales.

Es decir, no solo es importante que los equipos y el software utilizados en una prueba DLT tengan una reputación contrastada, y que se tengan en cuenta los efectos del paso del tiempo y de la energía aplicada en la prueba, sino que aún es más importante que los técnicos que utilizan estas herramientas estén debidamente formados y tengan amplia experiencia, tanto los que realizan las pruebas en obra como los que luego analizan los datos y hacen la modelización con el software.

El método rápido (RLT) es conceptualmente un método intermedio entre el estático y el dinámico. La carga se aplica con un dispositivo de impacto -como en el método dinámico- pero con suficiente amortiguación para que no se genere una onda de choque, lo que lo convierte en un método más parecido al estático. En la Figura 9 se ve un dispositivo StatRapid de Allnamics, como el que ya se ha utilizado en España para realizar pruebas RLT hasta 10 MN (1000 t) en 25 pilotes perforados.

En una prueba RLT se dan siempre varios impactos con altura creciente, normalmente entre dos y cinco, que generan varios ciclos de carga y

descarga como los cuatro que se ven en la Figura 10, correspondiente a una prueba StatRapid real. Mediante cálculos matemáticos sencillos y automáticos se pueden descartar los efectos dinámicos y de inercia, para conseguir una curva carga-asiento solamente estática, sin intervención del operador.



Figura 9. Vista de conjunto de un equipo StatRapid (fuente: Moscoso, N. y otros, 2019)

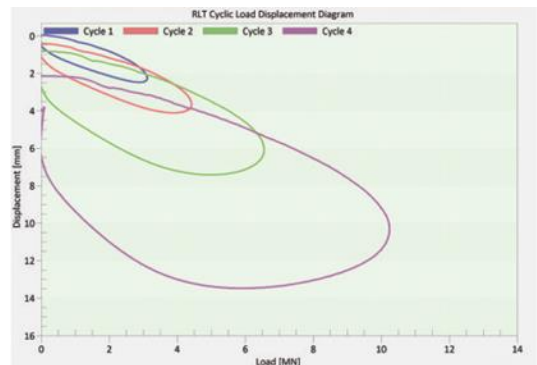


Figura 10. Varios ciclos consecutivos carga-descarga con StatRapid (fuente: Moscoso, N. y otros, 2019)

Los estudios comparativos entre pruebas SLT y RLT realizadas en los últimos años han demostrado que las simplificaciones utilizadas pueden ser correctas para pilotes en suelos granulares, pero sobrestiman mucho la resistencia del terreno en el caso de suelos cohesivos, probablemente debido a la dificultad de disipación de presiones intersticiales y al efecto de la velocidad de aplicación de la carga.

5 CONVERSIÓN DE RESULTADOS DLT Y RLT EN RESULTADOS SLT

Siempre se consideró que las pruebas de carga estática son las que más se acercan al comportamiento real del pilote en servicio, por lo que muchos códigos geotécnicos especifican que los resultados obtenidos en las pruebas DLT y RLT se deben comparar con los obtenidos en las pruebas SLT. Para ello, conviene recordar algunos aspectos importantes que tienen influencia en los resultados de las pruebas.

El primero es el tiempo transcurrido desde la ejecución del pilote hasta su prueba. Como se comentó antes, en pilotes hincados hay que tener en cuenta el fenómeno del “setup”, que sucede tanto si las pruebas son SLT como si son DLT o RLT. Lo más adecuado sería realizar las dos pruebas sobre un mismo pilote casi simultáneamente, pero esto no suele ser posible en la realidad de las obras. Sería ideal disponer entonces de unos datos de «setup» para cada tipo de suelo, pero eso no existe desgraciadamente, dado que la variabilidad es enorme. En pilotes hormigonados “in situ” también hay un efecto “setup” similar, pero no afecta tanto, puesto que las pruebas SLT deben esperar normalmente varias semanas a que el hormigón adquiera resistencia suficiente.

En la Figura 11 hay un gráfico carga-asiento con un contraste real entre una prueba DLT y una SLT sobre sendos pilotes prefabricados hincados iguales, situados a poca distancia en el mismo encepado. La prueba dinámica (marrón) se realizó 6 días después de la hinca y la estática (azul) 53 días después de la hinca.

La Figura 12 contiene otro ejemplo real con gráficos carga-asiento de un contraste entre pruebas, realizado en similares condiciones que el mostrado antes. La prueba dinámica (marrón) se realizó 21 días después de la hinca y la estática (azul) 75 días después de la hinca. El criterio de Davisson para la prueba SLT da una carga de hundimiento de 2,9 MN, prácticamente la misma que la prueba DLT.

El segundo aspecto importante que considerar, sobre todo en las pruebas DLT y RLT, es que su resultado depende de la energía aplicada por el impacto del martillo o maza en la prueba, como se expuso antes. En las pruebas estáticas también

puede suceder algo similar, cuando el sistema de aplicación de la carga (gato + reacción) no es capaz de alcanzar la carga de hundimiento del pilote, o cuando expresamente se realiza una prueba de carga sin el objeto de alcanzar el hundimiento.

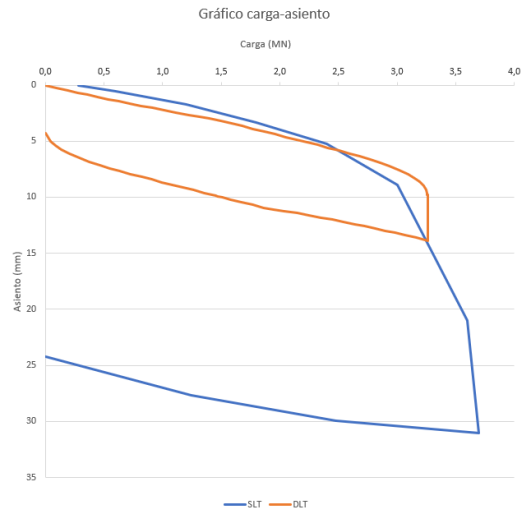


Figura 11. Contraste entre una prueba estática SLT y una dinámica DLT (fuente: elaboración propia)

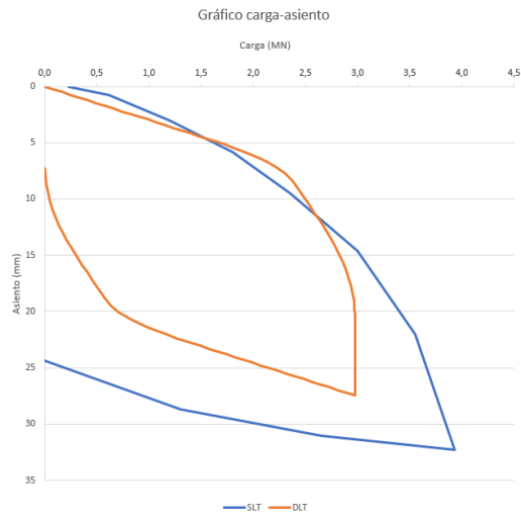


Figura 12. Contraste real entre una prueba DLT y una prueba SLT (fuente: elaboración propia)

El tercer aspecto importante es la cualificación y experiencia de los técnicos que realizan y super-

visan las pruebas de carga. Esto es muy importante en las pruebas DLT, como se expuso antes, pero también lo es en los otros tipos de prueba.

6 CONCLUSIONES

Los códigos de diseño de pilotes recomiendan contrastar las pruebas DLT y RLT con pruebas estáticas SLT, pero hemos visto que no es tan sencillo ni directo. Se deben tener en cuenta algunos factores importantes, entre ellos los siguientes:

- La disposición de la prueba SLT.
- El método utilizado para la determinación de la carga de hundimiento a partir de la curva carga-asiento en la prueba estática
- La influencia del tiempo transcurrido desde la instalación del pilote hasta la prueba.
- La energía aplicada en la prueba.
- La formación y la experiencia de los técnicos que realizan las pruebas.

En geotecnia estamos acostumbrados a utilizar varios ensayos o pruebas diferentes para determinar un cierto parámetro del suelo que nos resulte adecuado para diseñar una cimentación. Pero ya nadie se pone a contrastar el penetrómetro dinámico SPT con el cono estático, o el presiómetro con la placa de carga. Es más, solemos considerar como muy positivo el poder disponer de varios ensayos diferentes para así conseguir una visión más completa del problema geotécnico desde distintos ángulos. Del mismo modo, los contrastes entre pruebas DLT o RLT con SLT no tienen por qué ser una norma, sino simplemente una oportunidad más de obtener información relevante sobre el comportamiento de los pilotes de nuestro proyecto.

Lo importante es hacer pruebas de carga sobre los pilotes para comprobar su comportamiento real ante las cargas de diseño, dadas las incertidumbres que dejan otros métodos de cálculo. Los métodos de prueba a utilizar en cada caso podrán elegirse en función de las circunstancias particulares de cada proyecto y de la disponibilidad de equipos de prueba. Probablemente lo óptimo sea

hacer el mayor número posible de pruebas diferentes y adaptar luego los factores de seguridad al programa de pruebas realizado

AGRADECIMIENTOS

El autor siente una enorme gratitud hacia José A. Jiménez Salas, V. Escario, A. Serrano, C. Oteo, y otros grandes profesores del Laboratorio de Geotecnia del Cedex durante su etapa de becario doctorando, quienes hicieron nacer en él la pasión por los ensayos geotécnicos y en concreto por las pruebas de pilotes, así como a las empresas TNO, Piletest, PMC, GSP, PDI y Allnamics, por haberle introducido y apoyado en la utilización de las técnicas modernas de ensayo de pilotes

BIBLIOGRAFÍA

Fellenius, B.H., Guidelines for the Interpretation and Analysis of the Static Loading Test. Deep Foundations Institute (DFI), Nueva York, 1990.

Poulos, H.G., Pile load test methods - applications and limitations. *Libro homenaje a J.A. Jiménez Salas*. Ministerio de Fomento, CEDEX y SEMSIG, Madrid, 2000.

Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias (ROM 0.5-05). Puertos del Estado, Ministerio de Fomento. 2005.

Código Técnico de la Edificación (CTE), Documento Básico SE-C: Seguridad Estructural, Cimientos. Ministerio de la Vivienda, 2006.

Guía de cimentaciones en obras de carretera (GCOC). Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento, 2009.

Norma UNE-EN ISO 22477-1:2019. Ensayos de estructuras geotécnicas. Parte 1: Ensayos de pilotes: Prueba de carga estática de pilotes por compresión axial. (ISO 22477-1:2018, Versión corregida 2019).

Norma UNE-EN ISO 22477-4:2020. Ensayos de estructuras geotécnicas. Parte 4: Ensayos de pilotes: pruebas de carga dinámica. (ISO 22477-4:2018).

Moscoso, N., Fernández Tadeo, C., Bielefeld, M. y Verbeek, G. Rapid Load Testing of Foundations Piles in Barcelona, *Deep Foundations*, mayo-junio 2019, DFI, Nueva York.

Norma UNE-EN ISO 22477-10:2019. Ensayos de estructuras geotécnicas. Parte 10: Ensayo de pilotes: prueba de carga rápida. (ISO 22477-10:2016).