

RAPID LOAD TESTING: UNA EFICIENTE TÉCNICA PARA PRUEBAS DE CARGA EN PILOTES

RAPID LOAD TESTING METHOD: AN UPDATED TECHNIQUE TOWARDS PILE TESTING EFFICIENCY

Moscoso del Prado Mazza, Nicolás; *Allnamics, La Haya, Países Bajos, nicomoscosomazza@allnamics.eu*

Bielefeld, Marcel; *Allnamics, La Haya, Países Bajos, bielefeld@allnamics.eu*

Fernández Tadeo, Carlos; *CFT & Asoc., Barcelona, España, carlos@fernandeztadeo.com*

RESUMEN

Actualmente, los tipos de prueba de carga de pilote más usuales en España son las pruebas estáticas y dinámicas. Las pruebas estáticas son las más representativas del comportamiento de un pilote, ya que reproducen las condiciones a las que será sometido a lo largo de su vida útil. El método estático requiere tiempo y costes elevados, no solo para llevar a cabo el ensayo, un pilote por día, sino también para construir y cargar la estructura de reacción auxiliar, incrementando la duración desde varios días hasta incluso semanas para grandes cargas.

Las pruebas dinámicas, aplicando un impacto de corta duración, se desarrollaron para acelerar las pruebas de carga, llegando a ensayar varios pilotes por día. Debido al peso reducido de la carga de impacto, o a la utilización de un martillo de impacto, el tiempo y los costes se ven drásticamente reducidos. El incremento de la productividad se compensa con una menor representatividad de los resultados, donde las resistencias estáticas son difíciles de evaluar mediante equiparación de señales por análisis de ecuación de la onda.

Las pruebas de carga rápida, RLT, o cuasi-estática, se desarrollaron hace más de 30 años, combinando las ventajas de las pruebas estáticas y dinámicas y casi ninguna de sus desventajas. Son capaces de obtener resultados consistentes y precisos, independientes del usuario, con una productividad de dos o más pilotes diarios. Este artículo presenta una revisión de las pruebas de carga rápida, proporcionando una perspectiva histórica de su desarrollo hasta la actualidad, así como las bases teóricas en las que se fundamenta. Investigaciones independientes, varios códigos nacionales e internacionales y una larga base de datos respaldan este método de ensayo mundialmente aceptado. Finalmente, se presentan algunos estudios de caso, poniendo en perspectiva el estado actual del método.

ABSTRACT

Pile testing in Spain is currently dominated by Static and Dynamic load tests. Static tests are well accepted since they reproduce the static conditions that will occur during the designed life of the structure. The testing method is however time consuming and therefore also very expensive. Not only to perform the test, a day per pile, but also to mobilize, build and load a reaction frame to apply the required load. The duration of a complete test increases to several days per pile, even up to weeks when large loads have to be applied.

Dynamic Load Tests are much faster by applying a short duration impact load accelerating the tests up to several piles per day. Due to the limited weight of the drop weight, or by using an impact driving hammer, time and costs are strongly reduced. The increase of production rate is exchanged by a lower reliability of the tests results, where static resistances are uncertain to assess from the measured signals (by stress wave analyses and signal matching).

Rapid Load Testing, RLT, or quasi-static load testing, is a method developed 35 years ago that combines the benefits of both static and dynamic tests by ensuring consistent, accurate and user independent results combined with a high-test production rate of up to a number of piles per day. This paper will present a review of the Rapid Load Testing method, providing insight of its historical development and current theoretical background. Independent researches, national codes and a large database will provide reliability to this worldwide accepted method. Finally, some study cases will present an updated overview of the status of this testing technique.

1 - INTRODUCCIÓN

Las pruebas de carga estáticas consumen mucho tiempo y las dinámicas son dependientes del usuario, lo que limita la aplicación de las pruebas de carga en la práctica diaria. La necesidad de una nueva prueba de carga eficiente y fiable era una prioridad. STATic-dynNAMIC, un concepto aparecido en Hamilton, Ontario, en 1985, pretendía desarrollar una nueva prueba de carga de alta capacidad y coste competitivo,

combinando las ventajas de las pruebas estáticas y dinámicas, sorteando la mayoría de sus limitaciones: de ahí vienen las actuales pruebas de carga rápida (Rapid Load Testing, RLT). En 1989, el Instituto de Investigación Holandés TNO se unió a la investigación, y junto con la Birmingham Hammer Corporation crearon en 1989 el primer dispositivo Statnamic.

Tabla 1 - Proyectos notables con pruebas de carga rápida

Europa	
Países Bajos, 2017	Estación Central de la Haya
España, 2017	UTE-Syncrolift
América	
USA, Pensacola, 1998	Puente Bayou Chico
Argentina, Santa Fe, 2000	Puentes Saladillo & Amores
Asia	
Japón, Kobe, 1995	Hanskin Expressway (reconstrucción)
Taiwan, Taipei, 1999	Taipei 101
Oceanía	
Australia, Sydney, 1998	Villa Olímpica
Australia, Melbourne, 2001	Eureka Tower
Oriente medio	
Egipto, Alejandría, 1996	Librería de Alejandría
Emiratos Árabes Unidos, Dubai, 1997	Burj-Al-Arab

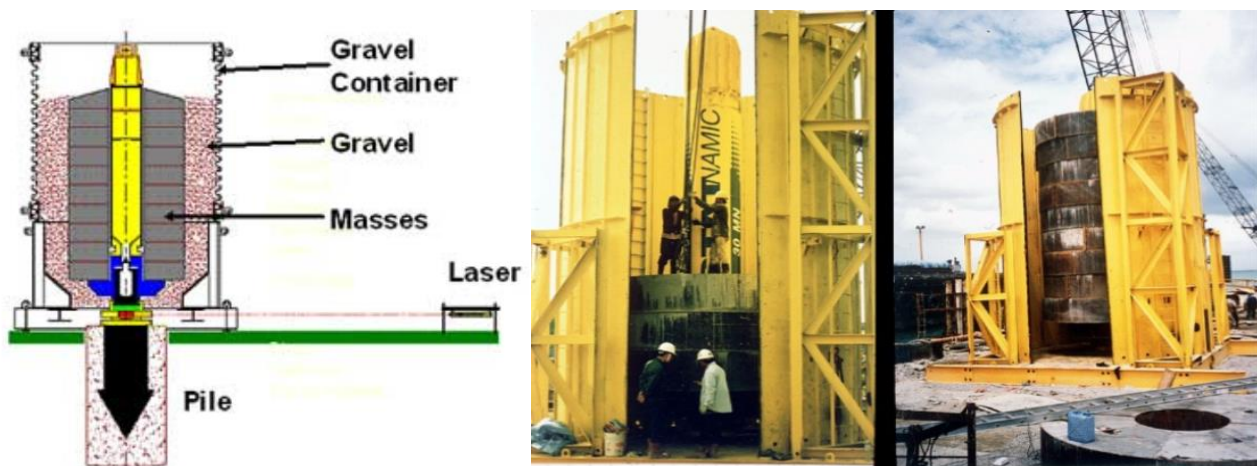


Figura 1 – Dispositivo Statnamic 30 MN, (Geonamics, 2018)

El dispositivo Statnamic, posicionado en la cabeza del pilote, consiste en una masa de reacción encima de una cámara de combustión. El combustible sólido hace ignición confinado dentro de la cámara. Conforme la presión generada aumenta gradualmente, la masa se eleva, creando una fuerza de reacción opuesta equivalente que se aplica en cabeza del pilote. Una vez el combustible se agota, la masa elevada cae sobre el contenedor donde una capa de gravas actúa como mecanismo de frenado. La aplicación de la carga en cabeza del pilote se realiza durante un periodo de tiempo relativamente largo (100-200 ms) comparado con el de las pruebas de carga dinámica (5-15 ms), permitiendo asumir un comportamiento cuasi-estático del pilote y del suelo. Al incrementar la duración de la aplicación de la carga, los efectos dinámicos se reducen, y se consigue una mejor concordancia con las condiciones estáticas.

Debido a las cada vez más estrictas regulaciones medioambientales y de seguridad, principalmente a causa del transporte del combustible, las pruebas Statnamic se han convertido en una preocupación en varios países. Los dispositivos para pruebas de carga rápida evolucionaron evitando el uso de un combustible, como Hybridnamic de Jibanshikenjo, y Spring Hammer Test de Matsumoto, ambos en 2004, y, el más reciente, StatRapid de Allnamics en 2012. Estos dispositivos avanzados generan una carga en el pilote mediante el impacto de una maza en caída libre. La maza de estos dispositivos, a diferencia de en una prueba dinámica, impacta sobre un sistema de muelles (relativamente flexibles) posicionados en la cabeza

del pilote que extienden la duración de la carga aplicada. Una vez la maza impacta, un mecanismo de freno se activa previniendo rebotes no deseados en la cabeza del pilote.

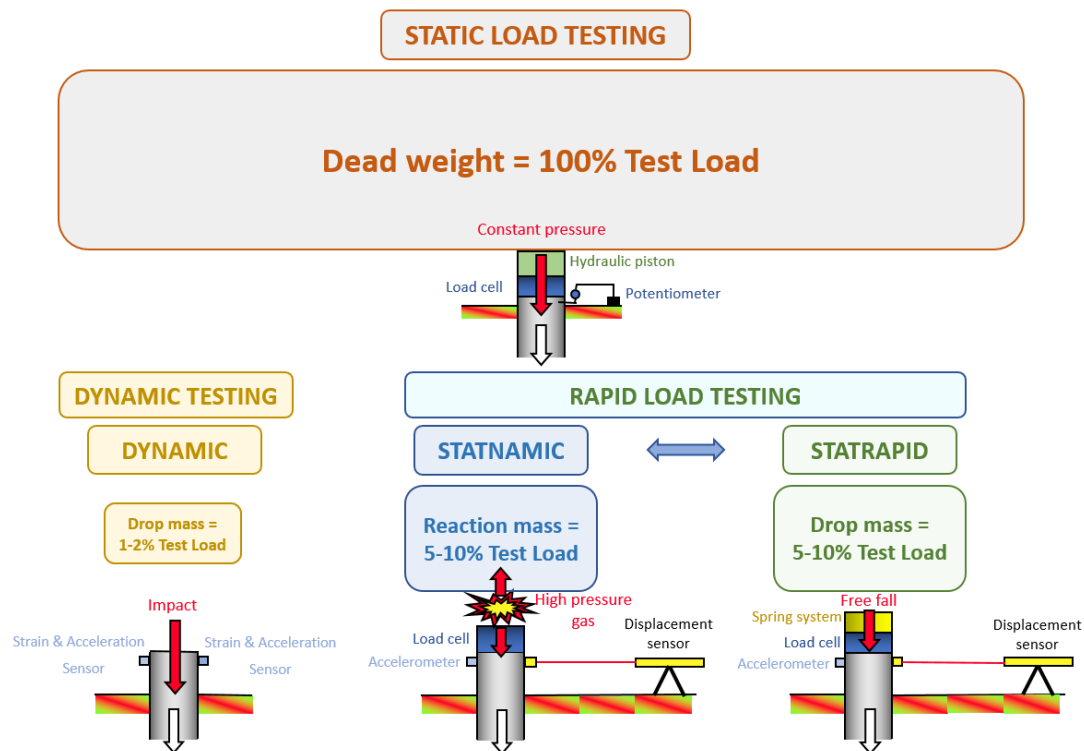


Figura 2 – Características de las distintas pruebas de carga

Ambos Statnomic y StatRapid son pruebas equivalentes donde la carga aplicada se dilata en el tiempo mediante un incremento gradual de la presión o mediante un sistema de muelles en los cuales el pilote y el suelo se comportan de manera cuasi-estática. StatRapid cuenta con una serie de ventajas respecto Statnomic, como evitar los complicados permisos y regulaciones, y con la posibilidad de regular la altura del impacto, reajustándola para movilizar la capacidad deseada en el pilote.

2 - MARCO TEÓRICO

La resistencia total del pilote puede separarse en una parte estática y otra dinámica. El comportamiento estático del suelo se modeliza mediante un muelle elasto-plástico. El comportamiento dinámico del suelo se compone de un amortiguador y una masa concentrada, representando respectivamente el comportamiento dinámico e inercial del suelo. Como muestra la ecuación [1], la resistencia estática se establece como $k \cdot u$, donde k representa la rigidez del suelo y u el desplazamiento del pilote. La resistencia dinámica se establece como $C \cdot v$, donde C representa la constante de amortiguación del suelo y v la velocidad del pilote, y la resistencia inercial se establece como $m \cdot a$, donde m representa la masa del pilote y a la aceleración del pilote.

$$F_{soil} = F_{static} + F_{damping} + F_{inertia} = k \cdot u + C \cdot v + m \cdot a \quad [1]$$

Las pruebas de carga dinámicas aplican una carga de impacto durante 5 a 15 ms, generando las conocidas ondas de tensión que se propagan a través del pilote a una velocidad de onda constante definida por las características del material, $c = \sqrt{E/\rho}$, siendo E el módulo de Young en Pa y ρ la densidad en kg/m^3 . La onda se propaga por el pilote desde la cabeza hasta la punta y después vuelve hacia arriba, con una velocidad característica de 5270 m/s para pilotes metálicos y aproximadamente 4000 m/s para pilotes de hormigón. La onda viaja desde la cabeza hasta la punta del pilote y vuelve arriba en un tiempo $T = 2L/c$, el periodo T . En general, la duración de la carga de una prueba dinámica es inferior a esta T , haciendo que los efectos dinámicos y el análisis de la ecuación de la onda sean factores críticos para una correcta prueba de carga. Debido a esta corta duración de la carga, se producen diferencias entre las velocidades de las partículas en segmentos de pilotes a diferente altura. Como consecuencia, la modelización que utiliza la ecuación de la onda es esencial para representar con precisión el comportamiento del pilote y del suelo. La caracterización de la amortiguación del suelo continúa siendo una de las suposiciones más variables y

dependientes del usuario, siendo una de las principales causas de la variabilidad de los resultados de las pruebas dinámicas.

2.1 - Método del punto de descarga, UPM

Las pruebas de carga rápida extienden la duración de la carga aplicada varias veces por encima de las pruebas de carga dinámica, del orden de más de 5 veces el periodo T , mediante el uso de un combustible o de un sistema de muelles, antes mencionados. El incremento de la duración de la carga elimina las diferencias de velocidad entre segmentos del pilote, permitiendo modelizarlo como un cuerpo rígido. En 1992, Middendorp et al. (1992), desarrollaron el método del punto de descarga (Unloading Point Method, UPM). Se trata del punto específico de la curva carga-asiento medida, en el cual el desplazamiento del pilote es máximo $u = u_{max}$ y la velocidad del pilote nula $v = 0$, donde se asume que el pilote tiene un comportamiento cuasi-estático, y las resistencias dinámicas son nulas. La ecuación [1] queda por lo tanto de la siguiente manera:

$$F_{soil} = F_{static} + F_{inertia} = k \cdot u + m \cdot a \quad [2]$$

El método asume que el pilote se comporta como un cuerpo rígido, donde todas las zonas del pilote se mueven en el mismo rango de velocidad. Para ello la duración de la carga T_f ha de cumplir el requisito para las pruebas de carga rápida, especificado en EN-ISO 22477-10 (2016):

$$10 < T_f / L_c \leq 1000 \quad [3]$$

Esta condición se demostró mediante una simulación por elementos finitos uni-dimensional basada en la ecuación de la onda por Middendorp y Bielefeld (1995) y Nishimura et al. (1998). La duración de la carga ampliada permite modelizar el pilote como una masa concentrada y un muelle, donde los efectos dinámicos de onda de tensión pueden despreciarse. Con F_{rlt} como la fuerza aplicada de la prueba de carga rápida, medida en la cabeza del pilote, tenemos, por equilibrio de fuerzas:

$$F_{rlt} = F_{soil} = F_{static} + F_{inertia} \quad [4]$$

La ecuación puede reorganizarse de la siguiente manera:

$$F_{static} = F_{rlt} - F_{inertia} = F_{rlt} - m \cdot a \quad [5]$$

Midiendo F_{rlt} con células de carga, y a con acelerómetros, la capacidad estática F_{static} puede ser determinada. La instrumentación se complementa con un sensor óptico que mide el desplazamiento de la cabeza del pilote, pudiendo comprobarse a través de la doble integración del acelerómetro.

Nguyen (2008) validó el método del punto de descarga como una teoría válida basándose en resultados experimentales, estableciendo, sin embargo, que la teoría solo es válida si las sobrepresiones intersticiales se tienen en cuenta. Estos efectos de sobrepresiones intersticiales pueden sobreestimar la capacidad movilizada del pilote. Actualmente se aplica una corrección en los análisis como se muestra en la ecuación [6], donde η representa el efecto de la velocidad de la carga (loading rate effects), dependiente del tipo de suelo.

$$F_{static,corrected} = \eta \cdot F_{static} \quad [6]$$

McVay et al. (2003) y Hölscher y Van Tol (2009) realizaron muchas de las pruebas comparativas entre RLT (pruebas rápidas) y SLT (pruebas estáticas), combinando casos con y sin hundimiento del pilote. Sus resultados fueron utilizados para estimar empíricamente el factor η , resumidos por Hölscher et al. (2011) en la Tabla 2. Intuitivamente, la velocidad de carga tiene un mayor efecto en suelos finos mientras que en arenas o rocas su efecto es bastante limitado.

Tabla 2- Factor de la velocidad de carga por tipo de suelo, (Hölscher et al., 2011)

Tipo de suelo	η
Roca	1
Arena	0.94
Arcilla	0.66

Cuando el estrato de suelo tiene varias capas, el factor de velocidad de carga se puede adaptar para representar de manera más precisa el comportamiento del suelo. Dependiendo de la resistencia del suelo en cada capa, medida por ejemplo mediante un CPT, se puede calcular un factor equivalente por efecto de la velocidad de carga como sigue:

$$\eta_{eq} = \frac{F_{stat,sand}}{F_{stat,sum}} \eta_{sand} + \frac{F_{stat,clay}}{F_{stat,sum}} \eta_{clay} \quad [7]$$

Siendo:

$$F_{stat,sum} = F_{stat,sand} + F_{stat,clay} \quad [8]$$

Las pruebas de carga rápida actuales solo instrumentan el pilote en la cabeza, permitiendo obtener únicamente la capacidad total movilizada, sin más diferenciación. En 1997, Justason (1997) propuso instrumentar la punta del pilote para definir su comportamiento mediante acelerómetros y extensómetros, para poder estimar la capacidad movilizada en la punta del pilote mediante el método del punto de descarga múltiple (MUP), diferenciando el pilote en dos segmentos. Mullins et al. (2002) extendieron el método a un pilote instrumentado en varios niveles, denominado como el método del punto de descarga segmentado (SUP).

Métodos tipo SUP y similares proporcionan una información más detallada sobre la capacidad del pilote, permitiendo separar la resistencia por punta de la resistencia por fuste. Sin embargo, no mejoran la precisión del resultado de la capacidad total. Generalmente, para la comprobación del diseño y de la capacidad del pilote, el método estándar de las pruebas de carga rápida es suficiente.

2.2 - Realización del ensayo

Previamente al ensayo se realizan simulaciones para optimizar los dispositivos de carga rápida a utilizar, incluyendo el cumplimiento del requisito de duración de la carga de la ecuación [3]. Como resultado, se puede predecir el sistema de muelles requerido o la cantidad de combustible necesario. Se simula la respuesta, basándose en los reconocimientos geotécnicos, en las dimensiones del pilote y en el dispositivo de carga rápida. Bielefeld y Middendorp (1995) realizaron simulaciones Statnamic con TNOWAVE, actualmente AllWave RLT, un programa basado en la ecuación de la onda que permite simular la respuesta del pilote utilizando la solución del método de las características.

En obra, como se ve en la Figura 3, el dispositivo de prueba de carga rápida se monta encima del pilote (1), (2), (3), las masas de impacto modulares se cargan en su contenedor (4) y la cabeza del pilote se instrumenta (5) con células de carga (5.A), un sensor óptico de desplazamiento (5.B) y un acelerómetro (5.C).

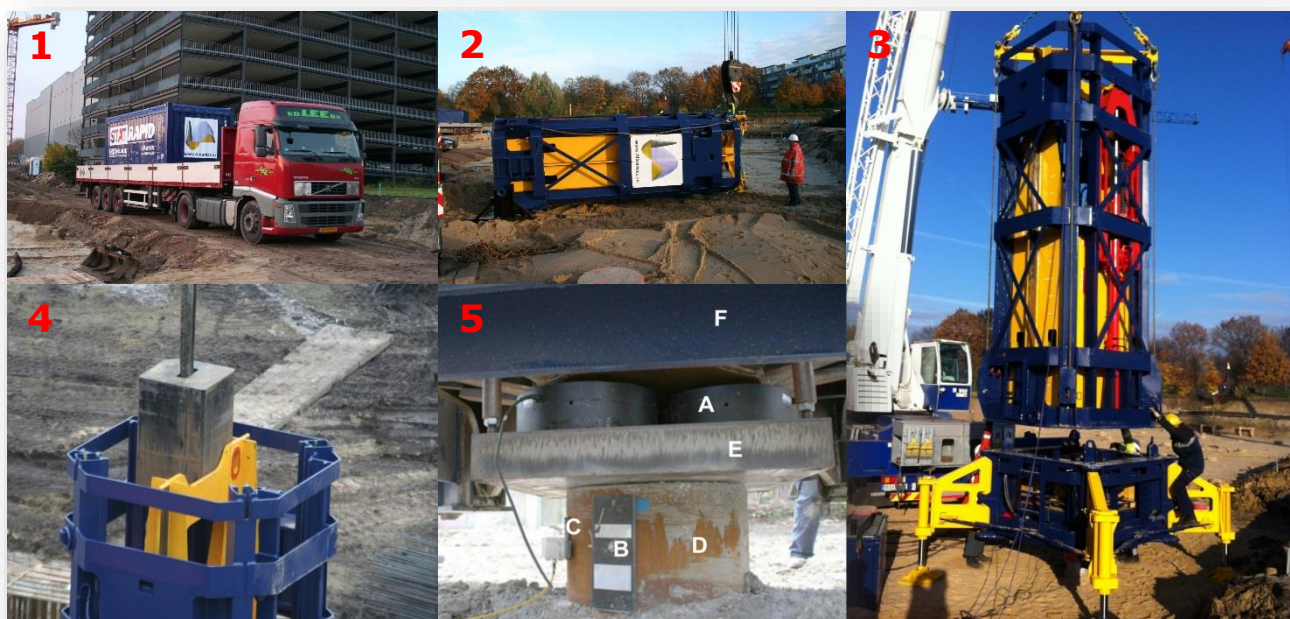


Figura 3 – Fases del montaje de una prueba de carga StatRapid

Las pruebas de carga rápida basadas en maza de impacto/sistema de muelles, como StatRapid, siguen un protocolo de ensayo formado habitualmente por entre 3 y 5 ciclos de carga crecientes. El primer ciclo empieza con una altura de impacto/carga de prueba, de 10 a 40% relativa a la supuesta capacidad de carga del pilote, para verificar la rigidez inicial del suelo. Las siguientes alturas de caída se establecen en base a la capacidad movilizada en el primer ciclo, con el objeto de alcanzar directa o gradualmente la capacidad de carga requerida en la prueba.

Las pruebas Statnamic realizan habitualmente un único ciclo, diseñado para carga última de ensayo. Después de cada ciclo de carga, elevar la carga de reacción, disponer el combustible sólido y después rellenar el mecanismo de frenado a base de grava puede tardar un día entero, como puede verse en la Figura 1. Los dispositivos Statnamic aplican habitualmente enormes cargas en pilotes, hasta 65-100 MN por el momento. Actualmente existen dispositivos Stat*Rapid* de hasta 16 MN, y dispositivos mayores en fase de diseño.

3 - ÁMBITO DE LAS PRUEBAS DE CARGA RÁPIDA

3.1 - Códigos Nacionales e Internacionales

Una joint venture de Bermingham Hammer Corporation y TNO Building and Construction Research desarrolló en 1989 el primer dispositivo Statnamic. Poco después, en 1991, el primer dispositivo Statnamic fue probado en Japón. Intrigados por la fiabilidad de este nuevo método de ensayo, el Tokyo Institute of Technology, liderado por Prof. Osamu Kusakabe, formó un equipo de investigación para realizar ensayos comparativos entre pruebas estáticas y de carga rápida (Statnamic). Los resultados de esa investigación se presentaron en el 1º y 2º Seminario Internacional Statnamic de 1995 y 1998, celebrados en Vancouver y Tokio, y dieron lugar a la redacción de una norma japonesa para este nuevo método de ensayo en 2002 por la Japanese Geotechnical Society (2002), siendo el primer país en hacerlo.

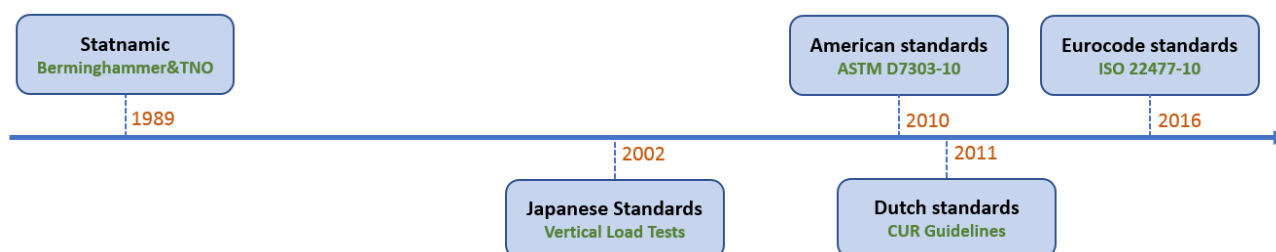


Figura 4 – Adopción de las pruebas de carga rápida en el mundo

Estados Unidos se añadió en 2008, aprobando ASTM su norma para las pruebas de carga rápida como D7383-08, actualizada en 2010 como D7383-10. Mientras tanto, en Europa, un equipo de investigación multinacional compuesto por Hölscher, Brassinga, Brown, Middendorp, Profitlich y Van Tol reagruparon sus investigaciones y experiencias independientes sobre Statnamic y Stat*Rapid* en la "CUR guideline of Rapid Load testing on Piles" de Hölscher et al. (2011). De manera similar a lo sucedido en Japón, esta investigación dio lugar a la implementación de este método de ensayo en el Eurocódigo en 2016, EN-ISO 22477-10 (2016).

3.2 - Comparación con otras pruebas de carga

Dependiendo del riesgo asumido y de la fiabilidad de los resultados requerida, siempre habrá una opinión subjetiva sobre que método de ensayo encaja mejor en cada proyecto. Una comparación cualitativa se puede encontrar en la Tabla 3, que debe usarse con precaución, debido a que cada proyecto puede tener aspectos críticos diferentes, así como motivos diferentes para probar los pilotes.

Las pruebas rápidas (RLT) comparadas con las estáticas (SLT) intercambian un poco de fiabilidad (a través de la corrección por velocidad de carga) por grandes mejoras en productividad y en reducción de costes. Una de las principales razones de la reducción de costes es el tiempo empleado en movilizar, construir y cargar la estructura de reacción. Especialmente en pilotes de gran capacidad, esta estructura de reacción puede necesitar pilotes provisionales, incrementando considerablemente la duración de la campaña de ensayos. Como aspectos negativos, las pruebas RLT no pueden ensayar la capacidad de un pilote a tracción, mientras que las pruebas SLT sí.

Tabla 3 – Comparación cualitativa de pruebas de carga, efecto positivo (+), efecto negativo (-)

Aspectos	SLT	RLT	DLT
Costes	---	++	+++
Fiabilidad	+++	++	-
Preparación del pilote	---	++	+
Daño en el pilote	+++	+++	+-
Resultados directos	+++	++	+-
Duración de la prueba	---	++	+++
Productividad de ensayos	---	++	+++

Las pruebas RLT proporcionan resultados más fiables e independientes del usuario, manteniendo una razonable productividad, comparados con las pruebas dinámicas (DLT) para todo tipo de pilotes. Para pilotes in-situ, los más críticos, se puede presentar sobre el terreno una alta variabilidad del módulo E y de su sección transversal. Estas variaciones desconocidas, que definen como las ondas de tensión se propagan e interactúan a través del pilote, tienen una influencia mayor en los resultados de las pruebas DLT, haciéndolas poco fiables para este tipo de pilotes. El comportamiento cuasi-estático de las pruebas RLT (comportamiento como cuerpo rígido) no requiere estimar el módulo de Young ni las variaciones de sección, posicionándose como el mejor método para ensayar ese tipo de pilotes. Incluyendo también la ausencia de fuertes compresiones o de tracciones en las pruebas RLT, las cuales si pueden ocurrir durante pruebas DLT. Como aspecto limitativo, las pruebas RLT solo proporcionan la capacidad total del pilote, mientras que las DLT proporcionan una estimación de la resistencia por fuste y por punta, que puede ser crítica si hay que probar pilotes sometidos a fuertes tensiones.

Las pruebas estáticas bidireccionales han de ser diseñadas con anticipación para que el cilindro de carga se posicione a la profundidad en el pilote donde la resistencia hacia arriba de la zona superior se estime igual a la resistencia hacia debajo de la zona inferior. Debido a que el nivel de equilibrio se predice basado en la misma investigación geotécnica que preocupa al contratista, está también sujeto a imprecisiones. Los resultados de las pruebas estáticas bidireccionales multiplican por dos la carga de rotura de la zona superior o inferior, sin llegar a saber la resistencia que queda en la otra zona. Las pruebas RLT no tienen que afrontar este problema ya que la carga se aplica sobre la cabeza del pilote, y la carga de hundimiento obtenida es la capacidad total del pilote.

4 - CASOS DE ESTUDIO: COMPARACIÓN CON PRUEBAS DE CARGA ESTÁTICAS

Varios estudios y comparaciones alrededor del mundo están disponibles y validan las pruebas de carga rápida. Sin embargo, existe todavía una falta de confianza en la aplicación de esta técnica, que está totalmente desarrollada. Esta sección agrupa algunos ensayos comparativos ya realizados, para proporcionar al lector herramientas para evaluar esta tecnología. El método del punto de descarga se utiliza en los siguientes ejemplos, siendo la teoría más aceptada.

de Gijt et al. (1995) realizaron un extenso programa de pruebas de carga en pilotes prefabricados de hormigón en el puerto de Rotterdam, como se ve en la Figura 5. Su comparación mostró que la relación de capacidad STN/SLT para el mismo asiento en el punto de descarga sobrestima la capacidad SLT en un 10% de media, con una horquilla variando desde 98% hasta 124%, por lo cual se trata de resultados perfectamente comparables teniendo en cuenta la habitual variabilidad propia de la geotecnia, incluso entre pruebas estáticas.

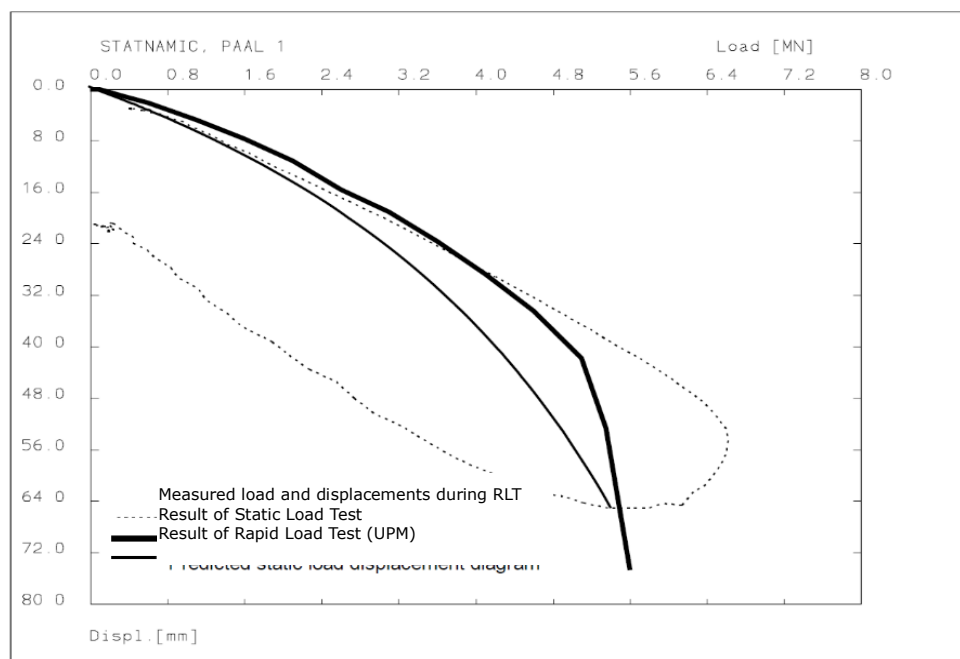


Figura 5 – Comparación curva de Carga-Asiento en ensayos SLT y STN en el puerto de Rotterdam Harbor, (de Gijt et al., 1995)

Bamrungwong et al. (2012) realizaron una serie de comparaciones entre ensayos SLT, DLT y SH (dispositivo RLT basado en maza de impacto/sistema de muelles) en diferentes lugares de Tailandia. Su análisis demostró la validez de las pruebas de carga rápida, animando a su implementación. Como se muestra en la Figura 6, existe una buena correlación entre SLT y RLT siendo superiores a la obtenida con DLT.

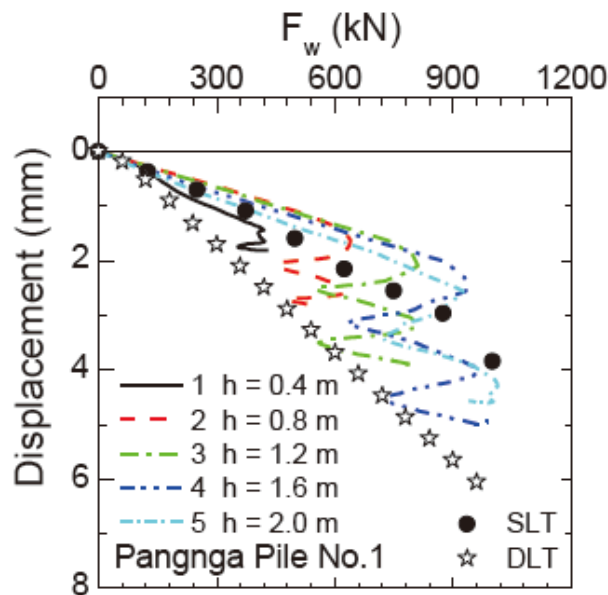


Figura 6 – Comparación curva de Carga-Asiento en ensayos SLT, DLT y SH (RLT) en la localización Pangnga, con h como la altura de impacto de la maza RLT, (Bamrungwong et al., 2012)

Allnamics desarrollo a su vez en 2016 una comparación entre pruebas SLT y STR (RLT), como se muestra en la Figura 7. En este artículo el número de comparaciones presentadas se limita a estos 3 casos. Existen muchos otros ejemplos donde las pruebas de carga rápida como StatRapid han sido comparadas. Mas correlaciones con más estudios y comparaciones pueden encontrarse en las referencias proporcionadas.

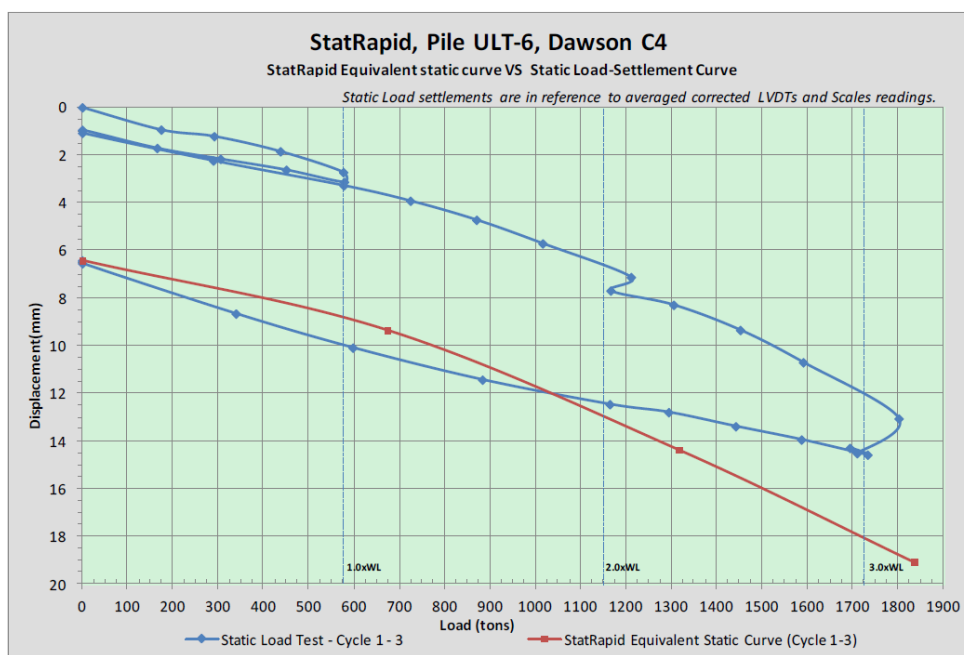


Figura 7 – Comparación curva de Carga-Asiento en ensayos SLT, DLT y SH (RLT) en la localización Dawson, Singapur, (Allnamics International, 2016)

CONCLUSIONES

Las pruebas de carga rápida se han desarrollado durante más de 30 años de conocimiento y experiencias. Varios autores han comprobado las hipótesis en las cuales se basa la interpretación de los resultados (el enfoque cuasi-estático con el método del punto de descarga) desde una perspectiva crítica, lo que ha llevado a una aceptación mayoritaria del método en todo el mundo. En este artículo se han mostrado algunos ensayos comparativos, ejemplos que pueden extenderse consultando las referencias. Los resultados se han reproducido y validado en diferentes países y numerosos autores concluyen que las pruebas de carga rápida RLT son un método consistente y fiable. Como resultado, este método se ha incorporado en normativas como ASTM y el Eurocódigo.

Comparado con otros métodos, las pruebas de carga rápida presentan varias ventajas. Respecto a las pruebas estáticas, RLT es un método eficiente donde no hay que construir una estructura de reacción y donde los tiempos de ensayo y los costes son drásticamente reducidos. Respecto a las pruebas dinámicas DLT, no hay que asumir parámetros dinámicos los cuales llevan a resultados dependientes del usuario. También puede superar ciertas limitaciones de las pruebas DLT en pilotes hormigonados in situ, en los que la sección real del pilote es desconocida. Como desventaja, los costes de RLT se incrementan en comparación con DLT pero proporcionan una mayor fiabilidad.

El uso de las pruebas de carga rápida continúa expandiéndose, tras más de 30 años de desarrollo. Normas y códigos de todo el mundo proporcionan una red de seguridad a las empresas constructoras y a los ingenieros consultores en la aplicación de este comprobado método. En 2017, *StatRapid* se estrenó por primera vez en la península ibérica, en el puerto de Barcelona, movilizand o cargas de hasta 10 MN en 25 pilotes, con una duración total de 8 días.

Las pruebas de carga rápida son perfectamente adecuadas para control de diseño y control de calidad, pruebas de pilotes preliminares, asegurar suficiente capacidad, permitir la optimización de las dimensiones de los siguientes pilotes, etc. Y en el caso de un proyecto parado en fase crítica debido a capacidades de pilotes inciertas, este método rápido y fiable puede desbloquear o incluso salvar un proyecto.

REFERENCIAS

- Allnamics International (2016) - Test report: Correlation test pile with Kentledge Load Test. Allnamics International Pte. Ltd., Singapore.
- Balderas-Meca, J. (2004) - *Rate effects in rapid loading of clay soils*. PhD-thesis University of Sheffield, England.
- Bamrungwong, C. et al. (2012) - Comparison of rapid load test, dynamic load test and static load test on driven piles. *9th International Conference on Testing and Design Methods for Deep Foundations*, Kanazawa, Japan.
- Bielefeld, M. y Middendorp, P. (1995) - Statnamic simulation. *1st International Statnamic Seminar*, Vancouver.
- Briaud, J. L. y Ballouz, M. (2000) - Static capacity predictions by dynamic methods for three bored piles. *Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 640-649.
- Briaud, J. L. y Garland, E. (1985) - Loading rate method for pile response in clay. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 319-335.
- Brown, M. J. (2004) - *The rapid load testing of piles in fine grained soils*. PhD-thesis University of Sheffield, England.
- Brown, M. J. y Hyde, A. F. L. (2006) - Instrumented rapid load pile tests in clay. *Geotechnique*, pp. 627-638.
- Brown, M. J. y Hyde, A. F. L. (2008) - Rate effects from pile shaft resistance measurements. *Canadian Geotechnical Journal*, pp. 425-431.
- Charue, N. (2004) - *Loading rate effects on pile load-displacement behaviour derived from back-analysis of two load testing procedures*. PhD-thesis Université Catholique de Louvain, Belgium.
- D7383-10 (2010) - Standard Test Methods for Axial Compressive Force Pulse (Rapid) Testing of Deep Foundations. West Conshohocken, *ASTM International*.
- de Gijt, J., van Dalen, J. y Middendorp, P. (1995) - Comparison of Statnamic Load Tests and Static Load Tests at Rotterdam harbour. *First International Statnamic Seminar*, Vancouver.
- EN-ISO 22477-10 (2016) - Geotechnical investigation and testing - Part 10: Testing of Piles: Rapid Load testing. *Eurocode 7: Geotechnical design*.

- Fernández Tadeo, C. (2017) - Pruebas de carga rápida en pilotes por primera vez en España. <http://fernandeztadeo.com/WordPress/?p=4356>, accedido 27/12/2017.
- Fernández Tadeo, C. y Téllez García, E. (2000) - Los ensayos de integridad estructural de pilotes. Situación actual en España y perspectivas. *Simposio de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica*, Barcelona.
- Geonamics (2018). Structural & Foundation: Statnamic Load Test. http://www.geonamics.com.my/statnamic_load_test.htm, accedido en 10/03/2018.
- Hadjuk, E. L., Paikowsky, S. G. et al. (1998) - The behaviour of piles in clay during Statnamic, dynamic and different load testing procedures. *2nd International Statnamic seminar*, Tokyo, Japan.
- Holeyman, A., Couvreur, J. M. y Charue, N. (2001) - Results of dynamic and kinetic pile load tests and outcome of an International prediction event. *Screw piles, Technology, installation and design in stiff clay*. Holeyman, A. (ed), Balkema, Lisse, NL.
- Hölscher, P. y Barends, F. B. J. (1992) - Statnamic load testing of foundation piles. *4th International Conference on application of stress wave theory to piles*. The Hague, the Netherlands, Balkema.
- Hölscher, P. et al. (2011) - *Rapid Load testing on piles, Interpretation Guidelines*. s.l., CRC Press. ISBN 9780415695206.
- Hölscher, P. y Van Lottum, H. et al. (2008) - Rapid pile test simulation in the GeoCentrifuge. *2nd BGA International Conference on Foundations*, Dundee, Scotland.
- Hölscher, P. y Van Tol, A. F. (2009) - Database of field measurements of SLT and RLT for calibration. *Rapid load testing on piles*, Taylor and Francis. Hölscher, P., Van Tol, A. F. (eds).
- Hölscher, P. y Van Tol, A. F. (2009) - Recent advances in rapid load testing on piles. Hölscher, P. & Van Tol, A. F. Francis Taylor.
- Horikoshi, K. y Kato, K. (1998) - Finite element analysis of Statnamic loading test of pile. *2nd International Statnamic seminar*, Tokyo, Japan, pp. 295-302.
- Huy, N. Q. (2008) - *Rapid load testing of piles in sand; Effects of loading rate and excess pore pressure*. PhD thesis Delft University of Technology, the Netherlands.
- Japanese Geotechnical Society (2002) - Standards of Japanese Geotechnical Society for Vertical Load Tests of Piles. *Japanese Geotechnical Society*, Tokyo.
- Justason, M. D. (1997) - Report of load testing at the Taipei municipal incinerator expansion project, Taipei City, Taipei.
- Jutstason, M. D., Mullins, G. et al. (1998) - A comparison of static and Statnamic load tests in sand: A case study of the Bayou Chico bridge in Pensacola, Florida. *Statnamic loading test '98*, Balkema, Rotterdam.
- Lowry, S. L. (2005) - *Analysis of Statnamic load test data using a load shed distribution model*. Graduate thesis, University of South Florida, United States.
- Maeda, Y., Muroi, T. et al. (1998) - Applicability of Unloading-Point-Method and signal matching analysis on Statnamic for cast-in-place pile. *2nd International Statnamic seminar*, Tokyo, Japan, pp. 99-107.
- Matsumoto, T. (1998) - A FEM analysis of a Statnamic test on open-ended steel pipe pile. *2nd International Statnamic seminar*, Tokyo, Japan, pp. 287-294.
- McVay, M., Kuo, C. L. et al. (2003) - Calibration resistance factors for load and resistance factor design for Statnamic load testing report, University of Florida.
- Middendorp, P., Beck, C. et al. (2008) - Verification of Statnamic load testing with static load testing in a cohesive soil type in Germany. *Proceedings of the 8th International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Lisbon, Portugal. Millpress Science Publisher.
- Middendorp, P., Bermingham, P. et al. (1992) - Statnamic load testing of foundation piles. *Application of Stress-Wave Theory to Piles*, The Hague, the Netherlands. Balkema, pp. 581-588.
- Middendorp, P. y Bielefeld, M. (1995) - Statnamic Load testing and the Influence of Stress Wave Phenomena. *1st First International Statnamic Seminar*, Vancouver.

- Mullins, G., Lewis, C. y Justason, M. (2002) - Advancements in Statnamic Data Regression. *Deep Foundations 2002: An International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance*, ASCE Geotechnical Institute, GSP No.116, Vol II, pp. 915-930, s.n.
- Nguyen, Q. H. (2008) - *Rapid load testing of piles in sand. Effects of loading rate and excess pore pressure*. Master of Engineering, Hanoi University of Civil Engineering, Vietnam.
- Nishimura, S. et al. (1998) - One dimensional stress wave simulation of rapid pile load tests, evaluation of boundary between STATNOMIC and dynamic loadings. *2nd International Statnamic seminar*, Tokyo, Japan.
- van Ginneken, G., Middendorp, P. y Fernández Tadeo, C. (2000) - Un nuevo método rápido de ensayos de carga de pilotes: STATNOMIC. Principios y utilización en Europa. *Simposio de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica*, Barcelona, Spain.