

Los ensayos de integridad estructural de pilotes.

Carlos Fernández Tadeo
CFT & Asociados, S.L.

Octubre 2010

RESUMEN

Son dos los métodos utilizados en nuestro país para comprobar la integridad estructural de pilotes mediante sistemas no destructivos:

- a) El método sónico mediante martillo de mano que genera una onda sónica que baja por el fuste del pilote, rebota en la punta y es captada por un acelerómetro. También se le conoce como "ensayo de impedancia mecánica" o "sonic echo" (en inglés).
- b) El método de cross-hole ultrasónico, que consiste en hacer descender un emisor y un receptor de ultrasonidos por dos conductos huecos paralelos en el interior del fuste del pilote, registrándose el tiempo que tarda la onda en recorrer la distancia entre ambos. También se le conoce como "sondeo sónico" o "ensayo por transparencia sónica".

El incremento de la demanda de estos ensayos en nuestro país ha provocado que estos salgan del ámbito de unos pocos especialistas para entrar de lleno en el abanico de servicios de los laboratorios generalistas de ensayos de materiales de construcción. Sin embargo, con frecuencia no se obtienen los niveles de calidad esperados en la realización de los ensayos, debido a que no siempre los equipos comprados tienen la tecnología óptima y a que las personas que los utilizan e interpretan no disponen muchas veces de la suficiente experiencia y preparación.

1.- GENERALIDADES

Los ensayos de integridad de pilotes suministran informaciones sobre las dimensiones físicas, la continuidad o la consistencia de los materiales empleados en los pilotes, y no suministran información directa sobre el comportamiento de los pilotes en condiciones de carga.

Estos ensayos no pretenden reemplazar a los ensayos estáticos de carga, sino que constituyen una fuente adicional de información sobre los pilotes construidos. Significan una potente herramienta de trabajo para poder determinar experimentalmente la existencia de defectos en los pilotes con rapidez y economía, por lo que son utilizados básicamente como control de calidad generalizado de los pilotes.

En el caso de detectarse anomalías mediante los ensayos de integridad, la dirección de obra puede recurrir a otros métodos para intentar investigar las causas, la naturaleza y la extensión de la anomalía, y determinar si el pilote es apto para el uso que se pretende. Los métodos empleados tradicionalmente en estos casos son la excavación alrededor del pilote y los sondeos con extracción de testigo continuo del fuste del pilote. La realización de sondeos solo permite obtener datos del testigo extraído y de las paredes del sondeo, cuya posición con respecto al eje del pilote es difícil de conocer exactamente cuando la profundidad es grande.

Los resultados de los ensayos de integridad necesitan ser interpretados por personal experimentado. Las modernas técnicas electrónicas e informáticas permiten un procesamiento y un tratamiento de las señales que facilitan la posterior presentación e interpretación de los resultados. No se puede esperar que los ensayos de integridad identifiquen todas las imperfecciones existentes en un pilote, pero son una potente herramienta principalmente como salvaguardia contra defectos importantes. Los ensayos de integridad pueden identificar defectos de menor importancia que no afecten gravemente al pilote, por lo que resulta fundamental la experiencia del técnico responsable de la interpretación.

Las pruebas de carga permiten conocer el comportamiento real de los pilotes en el terreno, sometidos a cargas generalmente superiores a las de servicio. Se realizan en la fase de proyecto de la cimentación, o en la fase de construcción, como comprobación del diseño realizado. Dadas las elevadas cargas a aplicar, usualmente del orden de cientos de toneladas, son ensayos muy costosos, por lo que la tendencia es a

realizarlos cada vez menos y solo en obras de elevado presupuesto. Los modernos ensayos rápidos de carga, de coste muy inferior, permiten la realización de pruebas de carga en obras de presupuestos medios, que se benefician así también del diseño más ajustado que admiten las normas cuando se realizan ensayos de carga.

2.- MÉTODOS DE ENSAYO DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL

Las nomenclaturas existentes son variadas y contradictorias en la literatura técnica y en la publicidad de las casas suministradoras de equipos y de las empresas que realizan ensayos, utilizándose palabras como "sónico", "sísmico" y "dinámico" con diferente significado según los autores, por lo que los nombres utilizados a continuación pueden no coincidir con los que aparezcan en otros documentos, aunque trataremos de hacer referencia más al método en sí que al nombre.

Son dos los métodos de ensayo de integridad estructural de pilotes más difundidos, que también se emplean en nuestro país:

- El más utilizado internacionalmente consiste en golpear la cabeza del pilote con un martillo de mano y obtener mediante instrumentación el movimiento de la cabeza del pilote como consecuencia de la onda de tensión generada. Es un método dinámico que induce una baja deformación en el pilote, denominándose generalmente "método sónico", aunque también se le nombra como "sísmico", "ensayo de integridad de baja deformación", "eco sónico" o "ensayo de impedancia mecánica". Se aplica a cualquier tipo de pilote, no requiere ninguna preparación especial en el mismo, ni necesita equipo pesado, por lo que resulta económico y de gran rendimiento (Figura 1, Figura 2 y Figura 3).
- Otro método muy conocido consiste en hacer descender un emisor y un receptor de ultrasonidos por dos conductos huecos paralelos en el interior del fuste del pilote, registrándose el tiempo empleado en recorrer la distancia entre ambos. Es también un método dinámico que induce una baja deformación en el pilote, denominándose generalmente "cross-hole ultrasónico", aunque también se le denomina "sondeo sónico", "sondeo sísmico", "ensayo sísmico paralelo", "cross-hole sonic logging" (en inglés) o "ensayo por transparencia sónica". Requiere que se dejen dos o más tubos embebidos en el hormigón, o que se realicen taladros en el hormigón endurecido. Una vez realizado esto, el ensayo es rápido y no precisa equipos pesados (Figura 4, Figura 5 y Figura 6). Este método se utiliza también en muros pantalla de hormigón armado.

Otro método de ensayo de pilotes que dispone de mucha tradición es el de las pruebas dinámicas de carga. Consiste en dejar caer una masa importante sobre la cabeza del pilote protegida por una sufridera, instrumentándose la cabeza del pilote para obtener la fuerza y la velocidad en función del tiempo. Es un método utilizado preferentemente en pilotes hincados, ya que aprovecha la misma energía proporcionada por el martillo de hinca. Es un método dinámico que induce una fuerte deformación en el pilote, denominándose generalmente "ensayo de respuesta dinámica" o simplemente "ensayo dinámico", y no se trata de un ensayo de integridad en sentido estricto sino de una prueba de carga. En pilotes hincados no requiere preparación especial ya que se utiliza el mismo martillo de hinca y la instrumentación es sencilla, pero en otros tipos de pilotes sí que requiere medios pesados, ajenos a los de ejecución del pilote, para disponer sobre el mismo una masa considerable con una cierta altura de caída. En la actualidad se han desarrollado sistemas más sencillos y transportables de dar la energía necesaria para el ensayo.

En la Tabla 1 figuran algunos de los parámetros característicos de los diferentes tipos de ensayos descritos, comparados también con los ensayos estáticos de puesta en carga.

TABLA 1

ENSAYOS	SÓNICOS	DINÁMICOS	SEMIESTÁTICOS	ESTÁTICOS
Masa martillo	0,5-5 kg	2000-10000 kg	2000-5000 kg	N/A
Deformación máxima en pilote	$2 \cdot 10^{-6}$	$500-1000 \cdot 10^{-6}$	$1000 \cdot 10^{-6}$	$1000 \cdot 10^{-6}$
Velocidad máxima en pilote	10-40 mm/s	2000-4000 mm/s	500 mm/s	10^{-3} mm/s

Fuerza máxima	2-20 kN	2000-10000 kN	2000-10000 kN	2000-10000 kN
Duración de la fuerza	0,5-2 ms	5-20 ms	50-200 ms	10 ⁷ ms
Aceleración del pilote	50 g	500 g	0,5-1 g	10 ⁻¹⁴ g
Desplazamiento del pilote	0,01 mm	10-30 mm	50 mm	> 20 mm
Longitud onda relativa (*)	0,1	1	10	10 ⁸

(*) Relación entre la longitud de onda de la fuerza aplicada y el doble de la longitud del pilote.

3.- MÉTODOS RÁPIDOS DE ENSAYO DE CARGA

El método más conocido es el mismo ensayo dinámico del capítulo anterior. Está descrito en la norma ASTM D 4945 y es utilizado en todo el mundo, tanto en pilotes hincados como en pilotes perforados.

En pilotes prefabricados la carga se aplica con el mismo martillo de hincadora empleado. En pilotes perforados y hormigonados "in situ" hace falta buscar una carga cualquiera con un peso entre 1 y 1,5 % de la carga de prueba estática y una altura de caída entre 2 y 3 m. Es decir, para una carga de prueba de 500 t, se necesita una masa de 5-7 t suspendida con una grúa.

La cabeza del pilote se prepara usualmente realizando un recrido de hormigón dentro de una camisa metálica, en el que se colocan los sensores de velocidad y deformación, con una superficie plana en el extremo superior protegida por una chapa metálica y una sufridera sobre la que se produce el impacto. La carga se eleva con una grúa y se deja caer sobre el pilote, registrándose en un ordenador portátil la fuerza y la velocidad en la cabeza del pilote en función del tiempo (Figura 7, Figura 8 y Figura 9). Es importante que la energía del impacto sea suficiente para movilizar la capacidad resistente del suelo. Por ello es usual aplicar 4 ó 5 golpes con altura de caída creciente, registrándose los parámetros de la respuesta del pilote.

Los resultados obtenidos se tratan en el ordenador con programas informáticos que incorporan diferentes fórmulas o métodos numéricos para estimar la capacidad de carga y presentar los resultados obtenidos de manera rápida, incluso en la misma obra. Es práctica usual realizar al menos un ensayo estático de carga de tipo convencional en un pilote ensayado dinámicamente, con objeto de correlacionar la resistencia estática y dinámica del pilote. En el caso de que exista ya experiencia local en pilotes similares con parecidas condiciones del subsuelo, se puede obviar el ensayo estático de carga.

El otro método rápido de ensayo de carga es el denominado "Statnamic". La carga se aplica de manera casi estática, con duración del orden de 100 milisegundos, mientras que en el método dinámico era de pocos milisegundos, por lo que no se produce onda de choque ni efectos dinámicos, que en determinados casos pueden llegar a dañar al pilote. Se empuja el pilote de manera suave hasta la carga de prueba prevista, obteniéndose una curva carga-asiento directa e instantáneamente. La aceleración que sufre el pilote es de 1 g, mientras que en el ensayo dinámico es de 100 a 1000 g.

Para conseguir aplicar una carga importante de esta manera suave, se utiliza un ingenioso sistema (ver [figura 13](#)) consistente básicamente en una cámara de combustión colocada en el centro de la cabeza del pilote, en la que se produce la ignición controlada de un combustible. La fuerza generada levanta un pistón sobre el que apoyan unos contrapesos importantes, del orden del 5 al 10% de la carga estática de prueba. Por el principio de acción y reacción, una fuerza centrada de igual magnitud comprime el pilote.

Los contrapesos pueden ser construidos "in situ", con materiales locales (hormigón o acero), de tipo modular, de manera que se pueden apilar sobre el pistón en piezas manejables de no más de 3 t de forma circular, con un hueco en el centro para dejar pasar un eje centrador, que sirve también de vía de escape de los gases de la combustión. El conjunto queda dentro de un contenedor cilíndrico exterior de chapa relleno de grava, que, al producirse la ignición y levantarse los contrapesos, rellena los espacios creados y

amortigua la caída posterior de los contrapesos. También se han desarrollado bastidores metálicos que simplifican la operación de frenado y sujeción de los contrapesos.

La instrumentación consiste en una célula de carga que mide directamente la fuerza aplicada a la cabeza del pilote y en un sensor de desplazamientos por láser colocado en la cabeza del pilote, sobre el que incide un rayo láser de referencia desde 20 m de distancia. Se obtiene de este modo una curva carga-deformación de manera instantánea en la pantalla del ordenador portátil que recibe las señales.

En la [Figura 11](#) se comparan los resultados obtenidos con dos pruebas estáticas de carga y una Statnamic en pilotes con carga de trabajo 1,55 MN (158 t) ensayados con carga de prueba 200 % de la de trabajo, 3,1 MN (316 t). Como se puede ver, los resultados son idénticos.

Se puede ensayar un pilote al día, con un costo sensiblemente inferior al de una prueba estática convencional.

En el "Libro Homenaje a José Antonio Jiménez Salas. Geotecnia en el año 2000" publicado por el Ministerio de Fomento, el Cedex y la Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica, se incluye un artículo de H.G. Poulos sobre métodos de ensayo de carga de pilotes, en el que se analiza los diferentes métodos y se concluye que el ensayo Statnamic es el que suministra más información sobre el comportamiento del pilote bajo carga.

4.- MÉTODO SÓNICO UTILIZADO POR CFT & ASOCIADOS

En el ensayo sónico de integridad de pilotes que realiza CFT & Asociados se utiliza un equipo PET desarrollado por Piletest.com Ltd, que cuenta con veinte años de experiencia en este tipo de ensayos, habiendo ensayado cientos de miles de pilotes en todo el mundo, y habiendo detectado miles de pilotes con defectos más o menos serios.

El ensayo es del tipo de martillo de mano, cuyo golpe envía una onda de compresión a lo largo del fuste del pilote. Esta onda es reflejada por las discontinuidades del pilote, por su punta, o por cambios de sección o variaciones del terreno que lo rodea. Los movimientos consiguientes de la cabeza del pilote son captados por un acelerómetro. La señal del acelerómetro es amplificada y digitalizada por un sistema electrónico y convertida en medida de velocidad, que se presenta inmediatamente en la pantalla de un microcomputador portátil. La curva obtenida se puede archivar en el disco duro del equipo para su posterior tratamiento e impresión mediante ploter o impresora. El gráfico de velocidad de un pilote continuo aparece en la pantalla como una línea relativamente recta con dos picos. El primero de ellos es el causado por el impacto del martillo, mientras que el segundo es causado por la reflexión en la punta del pilote. El programa informático incorpora diferentes técnicas para mejorar y explotar las señales obtenidas, tales como suavizar y promediar los golpes de martillo, la obtención de la curva media de varios pilotes, y la amplificación de la señal con la profundidad de manera lineal o exponencial para compensar los efectos de pérdida de señal con la profundidad.

Los pilotes no requieren ninguna preparación especial, únicamente se necesita que se haya realizado ya el descabezado en el momento del ensayo, para que el golpe del martillo se realice sobre hormigón sano y la onda no refleje en discontinuidades o coqueas del hormigón poco compacto existente en la cabeza del pilote antes del descabezado. La edad mínima del hormigón en el momento del ensayo es de siete días, para garantizar un grado de endurecimiento y un módulo de elasticidad que permitan que la onda se propague. En ocasiones se han conseguido obtener buenas señales a edades incluso más tempranas. Los ensayos no producen ninguna interferencia en la marcha de la obra, ya que se pueden ensayar grupos de pilotes a medida que se van construyendo y descabezando, y suele bastar un día o dos de preaviso para la realización de los ensayos. El rendimiento es elevado, y en condiciones óptimas se pueden ensayar más de 100 pilotes al día.

El ensayo sónico también se puede utilizar en pilotes de cimentaciones antiguas, realizando previamente una cata por el lateral del encepado y dando el golpe del martillo y captando la onda en un lateral del pilote.

El ensayo se realiza según la norma ASTM D 5882.

5.- MÉTODO ULTRASÓNICO "CROSS-HOLE" UTILIZADO POR CFT & ASOCIADOS

Los ensayos se realizan con el equipo CHUM, también de la casa Piletest.com Ltd, que utiliza tecnología puntera en el mundo. El método se basa en registrar el tiempo que tarda una onda ultrasónica en propagarse desde un emisor a un receptor que se desplazan simultáneamente por dos tubos paralelos sujetos a la armadura del pilote. El tiempo medido es función de la distancia entre el emisor y el receptor y

de las características del medio atravesado.

En el caso de existir defectos en el camino de las ondas tales como inclusiones de tierra, oqueadas, coqueas u otros que hagan alargar el tiempo de recorrido, en la gráfica del ensayo queda reflejada la variación y la profundidad a que se ha producido.

Los datos son almacenados de manera digital en el equipo, y las gráficas pueden ser impresas directamente en la obra o revisadas e impresas en gabinete. En la Figura 4, la Figura 5 y la Figura 6 se puede ver un esquema de funcionamiento y unas gráficas típicas.

Para la realización del ensayo se precisa que en los pilotes el constructor deje instalados tubos para poder introducir las sondas hasta la profundidad que se quiera ensayar. Los requisitos para estos tubos son los siguientes: Los tubos deben ser preferentemente de acero, con diámetro mínimo 40 mm y preferiblemente 50 mm. Se pueden emplear tubos de plástico en pilotes cortos, pero es muy fácil que se deterioren durante el hormigonado y queden inservibles. Los empalmes deben realizarse con manguitos roscados, ya que las uniones soldadas pueden producir rebabas que dificulten el paso de las sondas o deterioren los cables. Los extremos inferiores deben cerrarse herméticamente por medio de tapones metálicos, para impedir la entrada de elementos extraños y para evitar la pérdida del agua que deben contener durante el ensayo. Los extremos superiores deben también cerrarse para evitar la caída accidental de material hasta el momento de realización del ensayo. Sobresaldrán al menos 40 cm del hormigón del pilote. Los tubos deben llenarse de agua dulce limpia previamente al ensayo, y deberá comprobarse que no tienen obstrucciones, ni se producen pérdidas de agua. El número de tubos por pilote, según la norma francesa DTU 13.2, es el siguiente:

- 2 tubos para diámetros de pilote inferiores o iguales a 60 cm.
- 3 tubos para diámetros de pilote hasta 120 cm.
- 4 tubos para diámetros de pilote superiores a 120 cm.

Los pilotes deben estar accesibles y sin presencia de agua. El hormigón no tiene, en general, menos de una semana en el momento del ensayo. Es recomendable disponer de un plano con la identificación de los pilotes, su longitud aproximada, e información sobre posibles incidencias durante su construcción. En condiciones óptimas, se pueden realizar más de 130 m de ensayo a la hora.

El ensayo se realiza según la norma ASTM D 6760 .

6.- SITUACIÓN ACTUAL EN ESPAÑA

El mercado de los ensayos de integridad de pilotes se va ampliando paulatinamente en nuestro país. Ya no se concibe una construcción importante cimentada mediante pilotes en la que no se utilice alguno de los métodos de ensayo disponibles para comprobar la integridad estructural de los pilotes. La práctica totalidad de los pilotes de gran diámetro de las estructuras de las líneas de ferrocarril en construcción y de las nuevas carreteras y autovías se está ensayando mediante la técnica de "cross-hole" ultrasónico a través de tubos embebidos en el hormigón del pilote. Es también cada vez mayor el número de pilotes de edificación que se ensaya mediante el método sónico, analizando las ondas sónicas generadas por el golpe de un martillo de mano en la cabeza del pilote.

El incremento de la demanda de ensayos ha provocado que estos salgan del ámbito de unos pocos especialistas, para entrar de lleno en el abanico de la oferta de los laboratorios generalistas de ensayos de materiales en construcción. Sin embargo, con frecuencia no se obtienen los niveles de calidad esperados, debido a que no siempre los equipos comprados tienen un nivel tecnológico óptimo y a que las personas que los utilizan e interpretan no disponen muchas veces de la suficiente experiencia y preparación.

Para garantizar el éxito en los ensayos de integridad de pilotes son tres los requisitos básicos: Equipos de un adecuado nivel tecnológico, con el respaldo de centros internacionales de I+D de reconocido prestigio y experiencia. Operadores expertos en el manejo de los equipos y en las tecnologías geotécnicas, siendo indispensable para ello una titulación universitaria en geología o ingeniería civil. Supervisores especialistas expertos en la interpretación de ensayos, con formación, actualizada permanentemente en contacto con las fuentes origen de la tecnología y con la práctica de ensayos.

En la práctica se están diferenciando paulativamente los campos de aplicación de los dos métodos. Los motivos son de tipo económico más que técnico, realizándose los ensayos ultrasónicos "cross- hole" casi exclusivamente en pilotes de gran diámetro, debido a que la colocación de tubos embebidos y la mayor lentitud de ejecución los hace mas caros.

Los ensayos sínicos con martillo de mano son utilizados principalmente en el control de calidad generalizado de pilotes de diámetros medios a pequeños. Por una parte debido a que su rendimiento es grande, y en este tipo de obras suele haber muchos pilotes, y por otra porque los defectos suelen afectar a la sección completa del pilote y su detección con este sistema es inmediata.

7.- CONCLUSIONES

Los ensayos de integridad de pilotes constituyen una potente herramienta de trabajo para poder determinar experimentalmente la existencia de defectos en los pilotes. El método sínico con martillo de mano está siendo empleado en el control de pilotes, sin que sea preciso ninguna preparación especial del pilote ni interferir con la marcha de la obra, dada la sencillez y rapidez del ensayo y su economía. El método ultrasónico "cross-hole" está siendo empleado en el control de pilotes de gran diámetro, siendo la única preparación previa necesaria el dejar tubos embebidos en el hormigón del pilote.

Los modernos ensayos rápidos de carga permiten abaratar un método de diseño y comprobación de las cimentaciones mediante pilotes, que hasta ahora estaba reservado para obras de elevado presupuesto.

Tanto los ensayos de integridad estructural como los ensayos rápidos de carga disminuyen el margen de incertidumbre existente en la construcción de cimentaciones profundas. La norma geotécnica española más moderna (ROM 0.5-05) admite ya reducciones muy importantes de los coeficientes de seguridad empleados en el cálculo de pilotes, en el caso de realizarse ensayos de estos tipos, lo cual implica un abaratamiento de las cimentaciones en un grado muy superior al coste de los ensayos.

Imágenes



Figura 1: Realización del ensayo sínico con martillo de mano

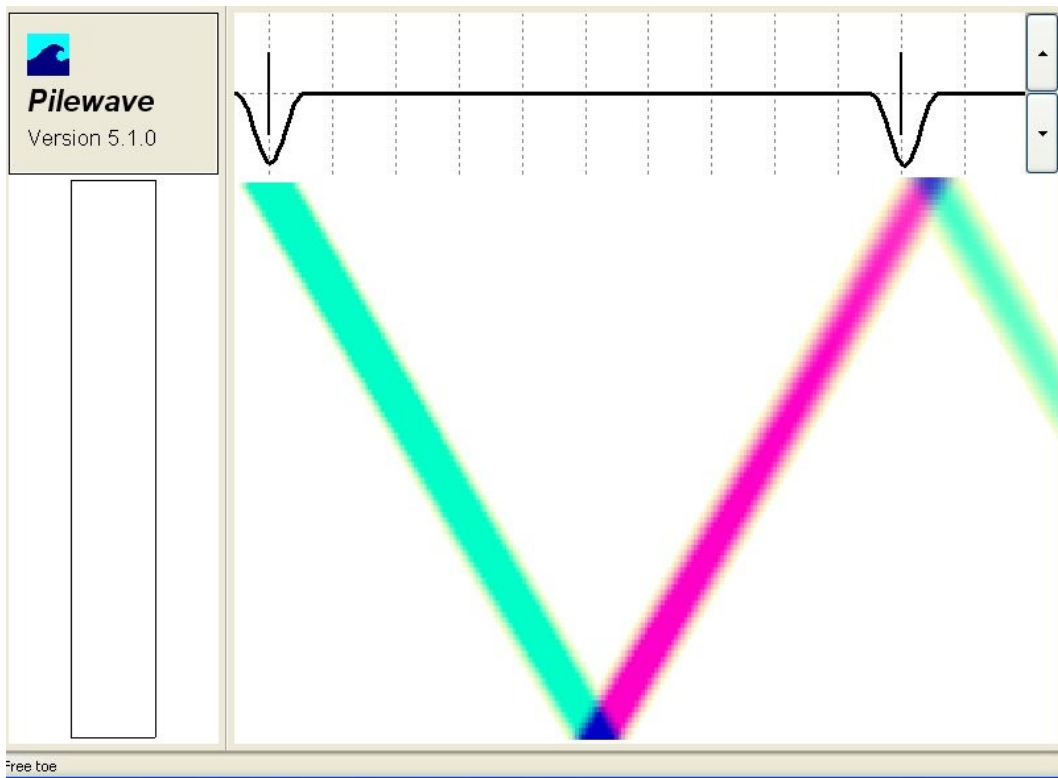


Figura 2: Ondas sónicas viajando a lo largo del pilote

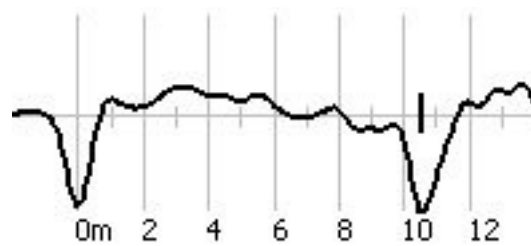


Figura 3: Gráfica resultado del ensayo sónico

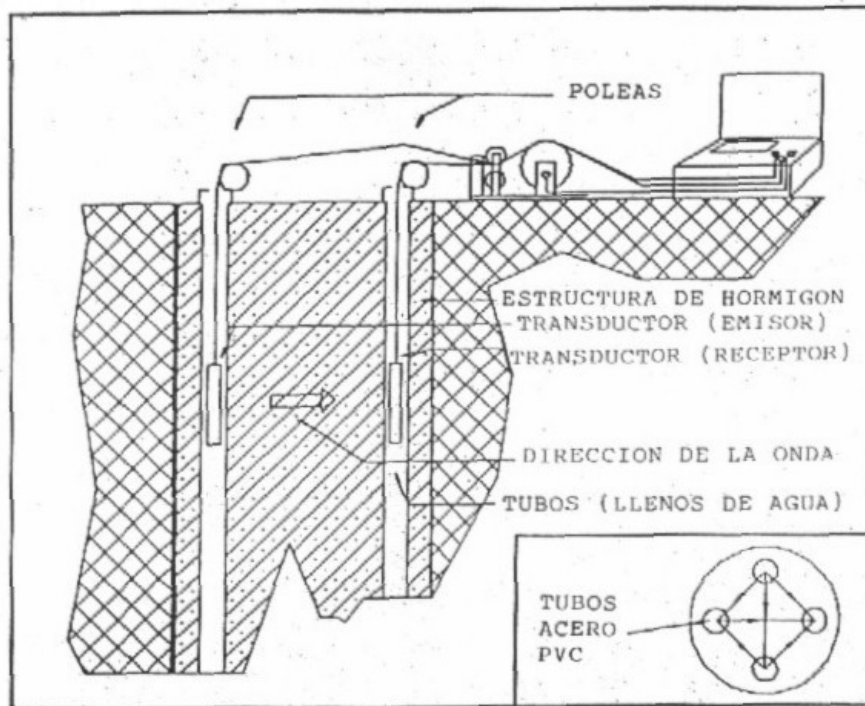


Figura 4: Configuración típica de ensayo ultrasónico "cross-hole"

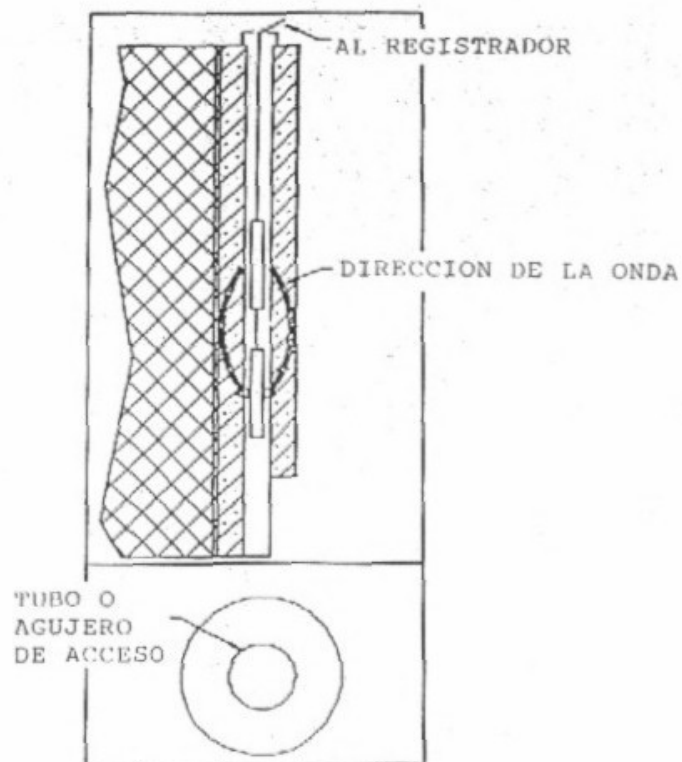


Figura 5: Configuración con un solo tubo embebido en el pilote

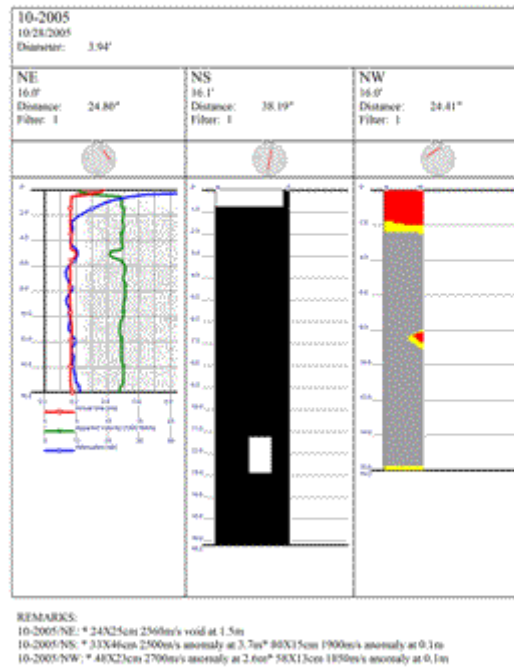


Figura 6: Diferentes tipos de gráficas de ensayo ultrasónico “cross-hole”

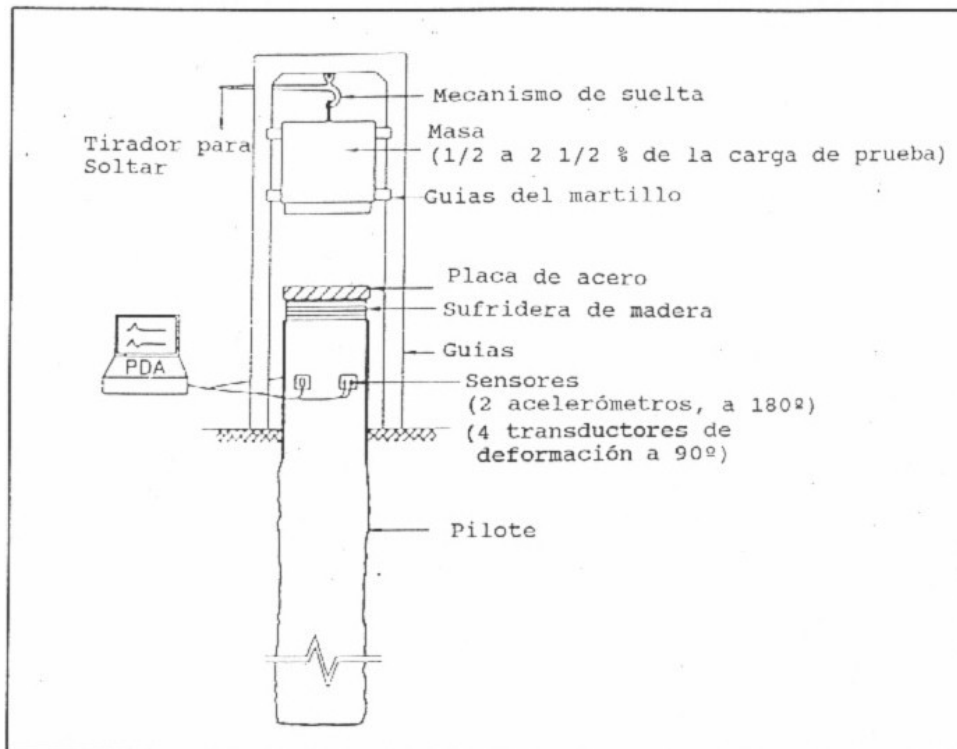


Figura 7: Esquema típico de ensayo dinámico



Figura 8: Ensayo dinámico de un pilote

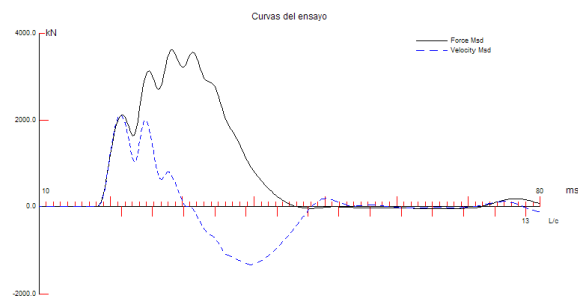


Figura 9: Registro de fuerza y velocidad en un ensayo dinámico

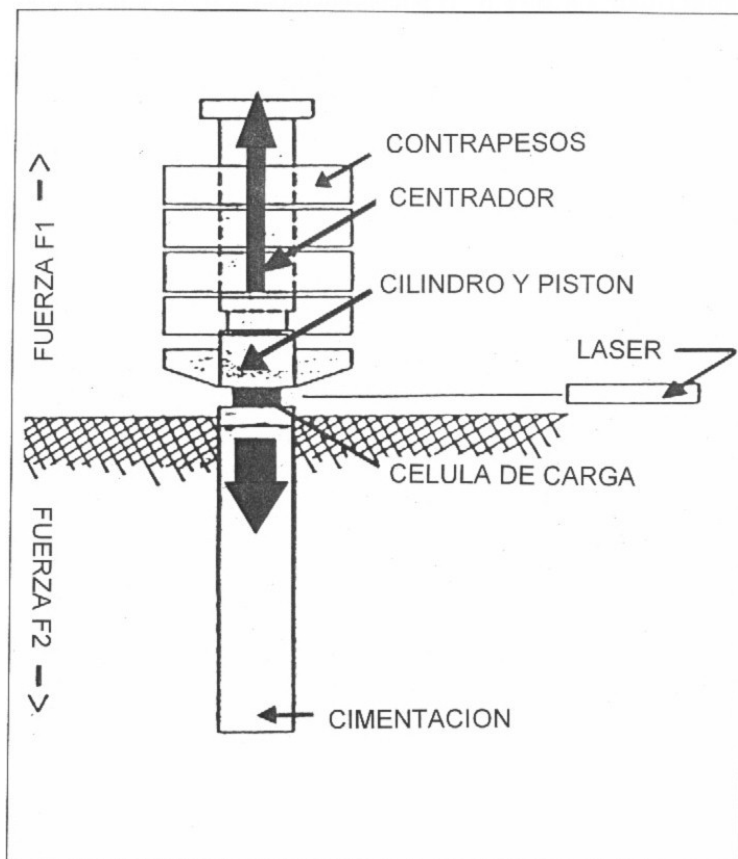


Figura 10: Esquema conceptual del ensayo Statnamic

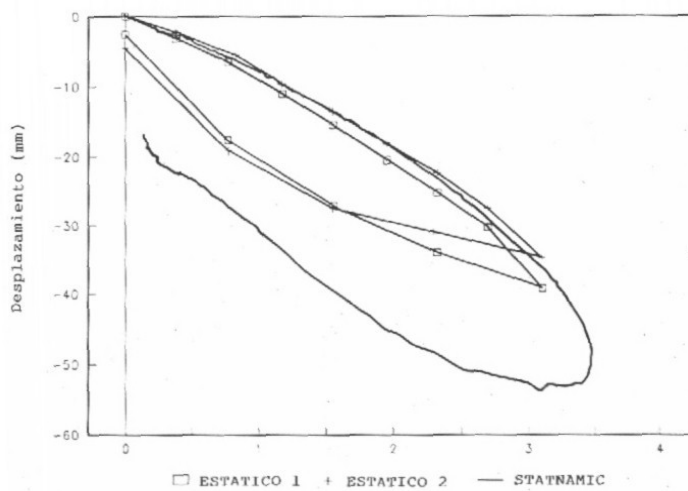


Figura 11: Curva carga - desplazamiento