

# PILOTES DE GRAN DIÁMETRO PARA FUNDACIÓN DE PUENTES EN CHILE

## EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA HASTA LA FECHA

### **Aldo D. Guzmán G.**

PILOTES TERRATEST S.A.  
ag@terratest.cl  
Santiago, Chile

### **Juan E. Schoennenbeck G.**

PILOTES TERRATEST S.A.  
jschoennenbeck@terratest.cl  
Santiago, Chile

### **Resumen**

El presente trabajo resume la evolución del uso de pilotes de gran diámetro para fundación de puentes en Chile, desde sus inicios, hasta la actualidad. Se analizan aspectos constructivos, determinantes para la calidad. Se comentan las normas o recomendaciones internacionales que normalmente se utilizan como referencia para los trabajos de pilotaje.

En la actualidad existen equipos de gran potencia y versatilidad en el país, para ejecutar pilotes de hasta 2,50 m de diámetro y hasta 70 m de profundidad.

Existen experiencias de pilotes para puentes con profundidad máxima de hasta 56.4 m y pilotes ejecutados con diámetro 2,00 m. También existe experiencia con pilotes empotrados en roca en longitudes de varios metros.

Se revisan los ensayos disponibles para pilotes en el país: ensayos de integridad y ensayos de carga. No nos constan experiencias registradas de ensayos de carga para pilotes de gran diámetro para puentes en Chile, aunque existen varias experiencias para pilotes en obras industriales y mineras.

Palabras Clave: pilotes, ensayos de carga, roca, ensayos de integridad

### **Abstract**

The present paper summarizes the evolution of the piling techniques for bridge foundations in Chile, from its beginnings to present. Some constructive aspects are discussed, relevant for quality. International standards and recommendations normally used as reference for bored piled (drilled shafts) works are presented.

Nowadays there are powerful piling rigs in Chile, able to reach depths of up to 70 m and pile diameters of 2,50 m.

The today records in the country are a maximum pile depth of 56,4 m and maximum pile diameter of 2,00 m. Rock sockets of several meters have already been performed in many bridge projects.

The available integrity and load tests are discussed. The authors have no evidence of pile load tests performed for bridge construction in Chile, although there are several successful experiences in industrial or mining projects.

Keywords: bored piles, drilled shafts, load test, roca, integrity tests



## 1. Introducción

El presente trabajo se refiere a la evolución de los métodos constructivos para pilotes de gran diámetro en Chile, algunas de las principales experiencias realizadas en proyectos de puentes en el país, el estado actual del arte y algunas tecnologías disponibles para el control de la ejecución y ensayos de carga.

## 2. Uso de Pilotes de Gran Diámetro para la fundación de puentes

El uso de fundaciones profundas en puentes obedece a la necesidad de transferir las cargas de la estructura a estratos resistentes y fuera de la zona de socavación general y localizada. Las cargas que llegan a nivel de fundación en los puentes requieren que los pilotes sean capaces de tomar momentos en varias direcciones, cargas horizontales (corte) y verticales que reciben de la superestructura.

## 3. Experiencias iniciales en Chile

La fundación profunda de puentes en Chile fue resuelta hasta mediados de la década de los '80 mediante cajones de fundación, ejecutados en forma manual, descendidos por excavación en su interior, en algunos casos con cámaras de aire comprimido ("cajones neumáticos").

Esta técnica ofrecía desventajas importantes: bajos rendimientos, difíciles condiciones de trabajo y altos riesgos de accidentes (sobre todo en el caso de los cajones neumáticos). Además, generalmente, los cajones se bajaban mediante "air lift" ("mamut" en la jerga nacional), lo cuál soltaba el terreno inmediatamente bajo la fundación del cajón.

A fines de los '80 aun existían muy pocos equipos para ejecución de pilotes en forma mecanizada en Chile. Desde inicios de la década de los '90 fueron aumentando constantemente los equipos de pilotaje disponibles en el país, incrementando sus capacidades, tecnología y los métodos de ejecución, adecuados a cada tipo de terreno. También fueron aumentando los diámetros y profundidades máximas que se alcanzaron. Si bien se ha observado una importante evolución en los métodos de ejecución y maquinaria de pilotaje, aún hay oportunidades de mejora, tanto en la investigación geotécnica previa, como en ensayos destructivos y no destructivos (ensayos de carga y de integridad cross-hole), los cuáles son muy poco frecuentes en el campo de la ingeniería de puentes, aunque se utilizan en el mercado en otros proyectos privados de envergadura

## 4. Evolución de la metodología de ejecución de pilotes en Chile

Los primeros equipos para pilotes preexcavados que se utilizaron en el país fueron los equipos "Benoto". Estas máquinas, de fabricación aproximada en la década del '50, se utilizaron en Europa hasta mediados de los '70. El equipo consistía en una máquina hidráulica, propulsada con motor diésel, sobre patines (no orugas) móviles mediante cilindros hidráulicos, para poder desplazarse en plataformas de mala calidad. El equipo poseía una morsa osciladora hidráulica, que permitía introducir una camisa metálica aplicando torque y empuje, mientras se excavaba el suelo en el interior mediante una cuchara bivalva, accionada por cabrestantes ("winches") montados en la base de la máquina. La máquina poseía una torre sobre la cuál se montaban las poleas y una guía para la camisa. Este tipo de equipo era lento, pero eficaz. Era posible utilizar trépano (cincel) accionado por el cabrestante de caída libre, para demoler clastos, bolones o roca.

Figura 1. Equipo Benoto en Chile (1996)



La que podría denominarse "segunda generación" de los equipos de pilotes preexcavados con cuchara que llegaron a Chile, consistían en morsas osciladoras montadas en grúas sobre orugas con cabrestantes de caída libre (Fig. 2). La metodología de excavación utilizada era la misma de los equipos Benoto: excavación con cuchara bivalva y trépano. La diferencia más importante consistía en la utilización de grúas como máquinas base, que posibilitaban una mayor movilidad y versatilidad en la obra. Según la información disponible por los autores, los primeros equipos de este tipo se habrían



empezado a utilizar en el país a inicios de los '90 y acotados a pilotes de diámetro 1,00 m.

En 1996 se introdujeron los primeros pilotes preexcavados de diámetro 1,50 m, para la construcción de una de las primeras concesiones viales en Chile: la autopista Talca-Chillán. En esa oportunidad apareció también por primera vez el concepto de "pila-pilote": al utilizar pilotes de diámetros mayores, es posible continuarlos hasta la viga cabezal transversal de apoyo de las vigas longitudinales del puente. Con esta solución, se ahorran los grandes encepados a nivel de terreno natural. Sin embargo, deben considerarse las tolerancias constructivas para el diseño adecuado de la conexión entre pilote y pila superior, lo que obliga a que la pila tenga menor diámetro que los pilotes si se desea mantener el emplazamiento de las pilas.

**Figura 2.** Grúa sobre orugas con morsa osciladora y cuchara (1996)



Paralelamente al desarrollo de la excavación con el sistema originalmente denominado "Benoto" (o sea, con morsa osciladora, cuchara y trépano), en la década de los '90 aparecieron en Chile los primeros equipos de perforación por rotación.

Existen varios tipos de equipos de perforación rotativa para pilotes de gran diámetro en el mercado internacional. Los que llegaron a Chile fueron básicamente equipos modernos hidráulicos, formados por (Fig. 3):

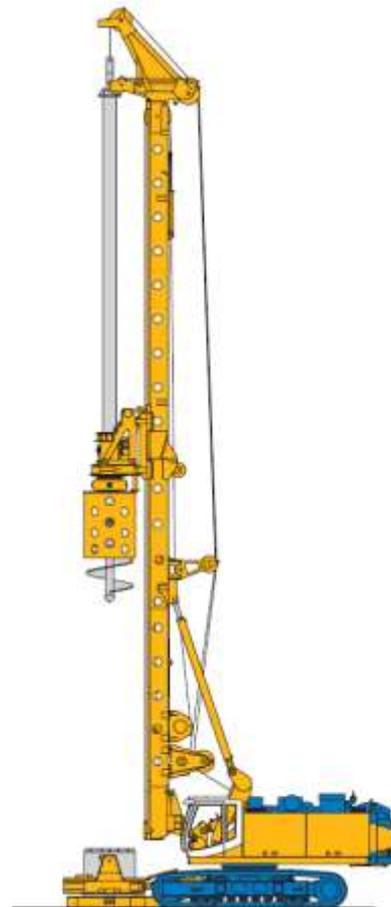
- una máquina base con motor diésel, sobre orugas, que es prácticamente una máquina de base de grúa o excavadora,
- un mástil,
- una barra telescópica "Kelly",
- un cabezal de rotación hidráulico,
- cabrestantes o "winches" hidráulicos: uno principal y uno auxiliar,

- morsa osciladora (opcional),
- herramientas de perforación rotativas de distinto tipo (baldes, hélices, "core barrel", hélices progresivas, etc)

Las piloterías hidráulicas rotativas se clasifican por su tamaño, según el torque máximo que puede proporcionar la cabeza de rotación del equipo.

Los equipos disponibles en el país tienen cabezas de rotación con torques que van desde 140 kNm a 390 kNm. Naturalmente a mayor torque, mayor capacidad de perforación, lo que implica no sólo posibilidad de penetrar en estratos muy resistentes, sino un mayor rendimiento y capacidad para ejecutar mayores diámetros de pilotes.

**Figura 3.** Pilotera Rotativa Hidráulica – Bauer BG28



El inicio de las concesiones viales, partiendo especialmente con la citada Talca-Chillán, multiplicó la necesidad de equipos de pilotes de gran diámetro. Desde 1996 en adelante fue aumentando gradualmente el número de equipos de pilotes disponibles en el país. Según nuestros datos, mientras a principios de la década de los '90 no habían llegado aún equipos rotativos al país, estimamos que a fines de la misma había al menos ocho equipos de este tipo disponibles en Chile, con diferentes capacidades.



Author1 et al.: Title of the Paper

Con los equipos hidráulicos modernos de perforación a rotación es posible utilizar diversas metodologías de ejecución de pilotes de gran diámetro:

- perforación rotativa con camisas recuperables,
- perforación rotativa bajo fluidos estabilizantes (lodos bentoníticos o polímeros),
- hélice continua (CFA)

Uno de los primeros grandes puentes construidos por un equipo de rotación fue el puente Llacolén, en Concepción, construido entre 1998 y 1999. Se construyeron poco más de 400 pilotes de diámetro 1,50 para cepas y estribos y diámetro 1,00 m para estructuras de acceso. Los pilotes de 1,50 m de diámetro fueron ejecutados por rotación con camisas metálicas recuperables, con longitudes máximas de aproximadamente 17,0 m. En las estructuras de acceso se ejecutaron pilotes a rotación, bajo lodos bentoníticos, mayormente de diámetro 1,00 m.

Desde el año 2000 hasta la actualidad, el número de equipos de pilotaje disponibles en el mercado ha ido aumentando gradualmente y se han introducido equipos modernos y de alta capacidad. Hasta 2013, el diámetro máximo disponible en el mercado seguía siendo de 1,50 m. Actualmente existen máquinas en el país para ejecutar pilotes a rotación con las siguientes capacidades máximas:

diámetro máximo de pilotes, ejecutados con camisas recuperables: 2.000 mm,

diámetro máximo de pilotes, ejecutados bajo lodos o polímeros: 2.500 mm,

Es importante destacar que no sólo la máquina debe tener la geometría para admitir el diámetro máximo, sino la capacidad de tiro del cabrestante principal para poder levantar el Kelly con la herramienta cargada, y el contrapeso para poder contrarrestar el momento volcante al aumentar la distancia entre eje de perforación y eje de la máquina o el peso de la herramienta.

Dentro de los equipos de excavación con cuchara y trépano se ha realizado recientemente una innovación relevante al introducir cucharas y trépanos de última generación con mayores pesos y prestaciones, permitiendo también alcanzar el diámetro de 2,00 m. Justamente, la primera experiencia en Chile de pilotes de más de 1,50 m de diámetro fue la reciente ejecución de pilotes de 2,00 m de diámetro en el Viaducto Las Chilcas (Pilotes Terratest – 2013/2014). Allí se utilizó una



morsa osciladora de última generación con una cuchara bivalva para dos cables con un peso operativo de 12,0 ton. La misma cuchara, equipada con valvas para pilotes de diámetro 1,50 m tiene un peso de 11,25 ton, mientras que la generación anterior de cucharas en el mercado sólo alcanzaba un peso de 4,3 ton para el mismo diámetro de pilotes. Esa diferencia, junto con trépanos de mayor capacidad y diseño avanzado, permitió ejecutar con buenos rendimientos, por primera vez en Chile, pilotes de diámetro 2,00 m, parcialmente empotrados en la roca longitudes unitarias de hasta 8,00 m.

A diferencia de los equipos rotativos, los equipos de pilotaje integrados por grúa, morsa osciladora, cuchara y trépano, son los preferidos cuando se trata de fundar en los suelos más difíciles, con clastos, grandes bolones o empotramientos en roca, cuando la resistencia a compresión de la roca supera los 50 MPa.

En cuanto a las longitudes máximas alcanzables en el país, los equipos disponibles actualmente permitirían una profundidad máxima de perforación de aproximadamente 70 m, según los diámetros utilizados, y considerando perforación bajo lodos. En perforación con camisas recuperables, es posible considerar profundidades máximas de 40 m.

#### Otra metodología disponible: Pilotes CFA

Pilotes de Hélice Continua (CFA = Continuous Flight Auger): consisten en pilotes ejecutados mediante perforación “en una pasada” con una hélice de gran longitud (de hasta aprox. 19 m), hormigonando mediante bomba durante la extracción de la hélice e instalando la armadura de inmediato en el hormigón fresco con la ayuda eventual de un vibrador. Esta tecnología tiene alta eficiencia y bajo costo, pero en Chile no ha sido aplicada en pilotes para puentes hasta ahora debido a que los diámetros disponibles son menores a los usuales (60 y 90 cm), está limitada a ciertas condiciones geotécnicas (suelos finos o mixtos sin grandes bolones o clastos) y tiene una limitación de profundidad. Además, la gran ventaja en

**Figura 4.** Grúa excavando pilotes de diámetro 2,00 m con camisa recuperable, con cuchara de 12,9 ton (Viaducto Las Chilcas)



rendimientos que supone el sistema, tiende a perderse en el caso de los pilotes de puentes, debido la cantidad y distribución de los mismos en la estructura. Sin embargo, es una metodología que podría ser ventajosa en casos especiales.

**Figura 5.** Pilotera Bauer BG24 con hélice continua (Pilotes Terratest)



## 5. Algunos casos especiales

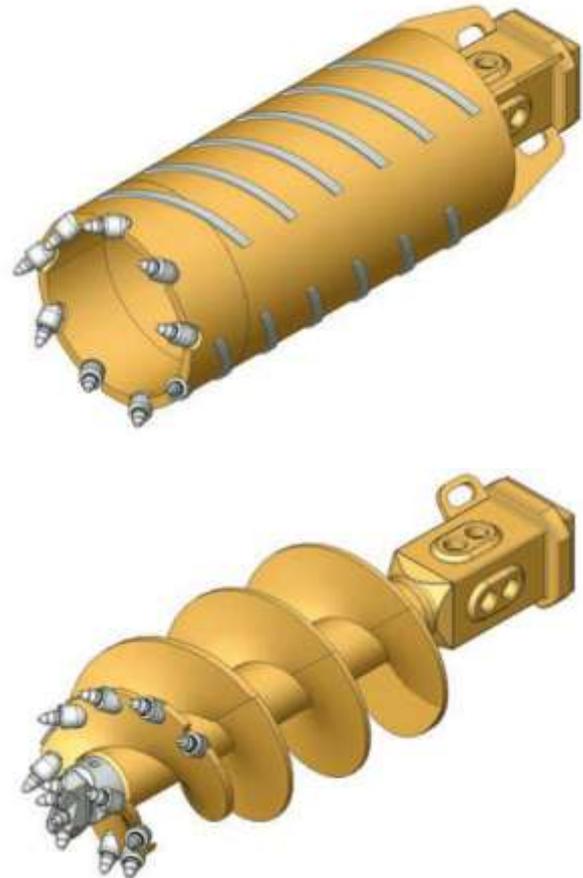
### Pilotes con empotramiento en roca

En muchos proyectos es necesarios empotrar pilotes en roca, lo cual es factible, aunque limitado por las características de la roca. Las metodologías que se han utilizado hasta el momento en Chile son:

- trépano y cuchara: el trépano (Fig. 7) puede utilizarse normalmente para rocas con resistencias a compresión simple de hasta 150 MPa.
- herramientas de rotación para roca (hélice progresiva y core barrel: Fig 6): están limitadas en la práctica para rocas blandas y medias hasta resistencias de compresión simple de hasta 100 MPa. Sin embargo, no es recomendable utilizar herramientas de rotación de roca para casos en que se superen resistencias de aprox. 50 MPa., por los altos desgastes implicados.

Los rendimientos de perforación en roca son muy variables, y dependiendo de la resistencia a compresión simple y RQD de la roca, están en el rango de 2,5 a 0,1 m<sup>3</sup>/hora, correspondiendo el rendimiento más alto a las rocas muy blandas (hasta 5 MPa) y el más bajo a rocas duras sobre 150 MPa.

**Figura 6.** Herramientas rotativas para perforación en roca (core barrel y hélice progresiva)



El uso de trépano o herramientas de rotación de roca más allá de los límites indicados es posible, pero los rendimientos son muy bajos y los desgastes de los equipos son muy altos.

Como casos especiales, cuando la resistencia de la roca es muy alta (sobre 150 MPa) o cuando se requiere incrementar los rendimientos de perforación en roca, ya se han aplicado en Chile dos alternativas técnicas:

- “Roller bit core barrel” (“core barrel” especial dotado de conos): con esta herramienta se corta un espacio anular en roca de mayor tamaño y luego se puede usar trépano para romper el testigo interior.
- preperforación de pequeño diámetro para combinarla con el uso de trépano: en este caso la preperforación en varios puntos de la sección del pilote con un diámetro de



aprox. 150 mm, desconfinan la roca y mejora el rendimiento posterior del trépano.

Debe tenerse en cuenta que cuando se ejecutan pilotes con camisa recuperable, éstas normalmente no pueden penetrar en la roca. Por lo tanto, en el diseño debe considerarse la reducción del diámetro del pilote en el empotramiento en roca, que corresponde al diámetro de las herramientas de corte que se utilizan al interior de las camisas. Por ejemplo, en caso de pilotes de diámetro 1,00 m, el diámetro de un empotramiento en roca será de 0,90 m. En caso de pilotes de diámetro 1,50 m, el diámetro será de 1,35 m. Lo anterior no ocurre en el caso de pilotes ejecutados bajo lodo bentonítico. Sin embargo, en este caso debe considerarse que el diseño contemple un diámetro que corresponda a un diámetro estándar de las herramientas de roca a utilizar, para no encarecer el proyecto.

Figura 7. Trépanos especiales para roca (Viaducto Las Chilcas)



### Pilotes en terrenos con napas artesianas

Las normas internacionales recomiendan trabajar siempre con una sobrepresión hidráulica positiva en el interior de la perforación para contrarrestar la presencia de posibles napas artesianas, evitando el sifonamiento del fondo e inestabilidad en las paredes de la perforación. En la práctica esto se traduce en las siguientes medidas posibles para trabajar en condiciones de napa artesiana:

- Elevar la cota de la plataforma de trabajo, para que la presión del agua o fluido de perforación en el interior de la perforación sea por lo menos equivalente a una altura de 1,00 m de agua [1].
- Utilizar una extensión de la camisa metálica para que se pueda elevar el nivel del fluido o agua en el interior de la perforación, de forma de garantizar una sobrepresión mínima equivalente a 1,00 m. [2].
- Reducir la presión artesiana mediante pozos de alivio.

En muchos casos de obras de puentes en Chile, con presencia de napa artesiana, se ha observado desconocimiento de estas especificaciones de las normas, que deben considerarse reglas del arte. El uso de una camisa perdida cuando existe presencia de napa artesiana puede no ser la medida necesaria y cuando se especifique, deben tenerse en cuenta aspectos constructivos muy relevantes que se explican en el punto siguiente.

### Pilotes con camisa perdida

La utilización de camisas perdidas es típicamente necesaria cuando se ejecutan pilotes a flote ó desde una plataforma a través de una lámina de agua. En estos casos, dado que debe construirse el pilote hasta una cota normalmente superior al nivel del agua, se procede hincando una camisa perdida y luego perforando bajo lodo bentonítico. La camisa actúa como moldaje o encofrado para confinar el hormigón en el tramo de agua.

Otro caso donde se requiere instalar camisas perdidas es cuando se prevé la existencia de oquedades o cavernas, con el fin de contener el hormigón. También puede ser necesario utilizar camisas perdidas en caso de terrenos muy blandos.

Es habitual observar proyectos donde se especifica el uso de camisas perdidas con el fin de controlar fallas constructivas por presencia de napas artesianas. Al respecto, cabe destacar que las medidas prioritarias para controlar una napa artesiana se han explicado en el apartado anterior. El uso eventual de una camisa perdida para controlar la napa artesiana no sería necesario si la sobrepresión hidrostática (del agua o fluido de excavación ó del hormigón fresco) dentro de la perforación se mantiene durante todo el proceso [1]. Por otro lado, se ha observado que en muchos casos se ha especificado el uso de camisas perdidas sin aclarar que deben instalarse mediante hinca y no simplemente en una perforación ya ejecutada, puesto que es necesario garantizar la transferencia de carga vertical y sobre todo la capacidad de transferir la carga lateral. En caso que la hinca de la camisa perdida sea inviable, debe preverse la inyección con lechada o mortero del espacio anular entre la camisa perdida y el terreno para garantizar la adecuada transferencia de carga de los pilotes al terreno [2]. Este punto es extremadamente importante para los pilotes de puentes en zonas sísmicas, dado que la falta de restricción lateral en los pilotes llevaría a un incremento de solicitaciones muy importante en caso sísmico, quedando los pilotes subdimensionados.

## 6. Normas y Recomendaciones constructivas

En Chile no existen normas específicas de pilotes preexcavados, excepto el capítulo correspondiente en el Manual de Carreteras del MOP [3].

Internacionalmente existen normas y recomendaciones modernas y relevantes que cubren el diseño y/o la construcción de pilotes de gran diámetro.

Dentro de ellas, merecen citarse las siguientes:

[1] Norma Europea EN 1536:2011, "Ejecución de trabajos geotécnicos especiales: Pilotes perforados"

[2] Drilled Shafts: Construction Procedures and LRFD Design Methods, FHWA NHI-10-016 (Mayo 2010)

La norma europea EN 1536 [1] cubre aspectos constructivos y no trata temas relativos al diseño. El Manual [2] de FHWA cubre aspectos constructivos y de diseño en base a AASHTO.

Dentro de los aspectos constructivos relevantes de los pilotes preexcavados que merecen comentarse en base a las experiencias existentes en el país, hay dos particularmente importantes:

### Separación mínima de las armaduras

Es muy importante mantener las separaciones mínimas entre barras longitudinales y entre estribos, según especifican las normas, para garantizar el paso del hormigón a través de la armadura durante el proceso de vaciado (Fig. 8). Mientras la norma EN 1536 especifica una separación mínima de 80 mm entre barras longitudinales o transversales, cuando se utiliza un árido de tamaño máximo 20 mm. Sin embargo [2] recomienda, en base a estudios recientes realizados por Deese y Mullins (2005), que la separación libre mínima entre barras debe ser de al menos 8 veces el tamaño máximo del agregado grueso en los hormigones vertidos bajo tubería "tremie". Sin embargo este hallazgo no está aún reflejado en la norma europea. Una técnica recomendable es colocar barras longitudinales y estribos en paquetes, para incrementar entonces la distancia libre entre barras (Fig. 9).

**Figura 8.** Pilote sin recubrimiento por separación libre entre armaduras insuficiente.



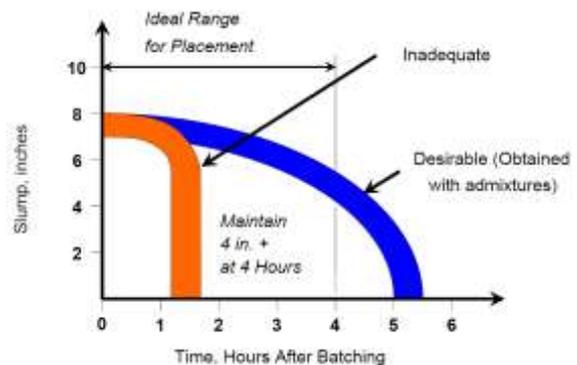
**Figura 9.** Ejemplo de estribos dobles para aumentar la distancia libre y permitir el ejemplo del hormigón (los separadores de la foto son inadecuados!)



### Características de flujo del hormigón

El hormigón de pilotes debe cumplir con varias características especiales, pero una de las más relevantes de comentar, por ser particularmente importante para los pilotes es la pérdida de cono. En [2] se recomienda que los hormigones para pilotes deben tener una pérdida de cono gradual, garantizando mantener aún un cono superior a 10 cm a las 4 horas de mezclado (Fig. 10).

**Figura 10.** Pérdida de cono en el hormigón para pilotes



Los problemas comunes de calidad en la ejecución de pilotes producto de hormigones vertidos con rápida pérdida de cono son los siguientes:

- Recubrimiento defectuoso debido a que el hormigón no pudo traspasar la armadura.
- Pilotes "cortados" (con inclusiones de suelo o de hormigón contaminado), debido a que el último hormigón no puede fluir a través del tremie inserto en el hormigón vertido anteriormente que ya perdió la consistencia necesaria. Esto hace necesario retirar el tubo tremie por sobre el nivel de hormigonado para poder continuar con el proceso.

- Deformación por torsión de armaduras producto de la rotación de la tubería recuperable durante su extracción. Cuando la consistencia del hormigón es inadecuada, este último transmite los esfuerzos a las barras producto de los desplazamientos de la tubería recuperable.
- Mayor esfuerzo de compresión sobre la armadura durante la extracción de las camisas recuperables, producto de la mayor viscosidad del hormigón, al descender para ocupar el espacio anular que libera el espesor de las camisas.

## 7. Ensayos de integridad

Actualmente en Chile se ejecutan dos tipos de ensayos de integridad:

Ensayo eco e impedancia mecánica: estos ensayos se ejecutan de acuerdo a la norma ASTM D5882-00 (Low Strain Integrity Testing). El ensayo consiste básicamente en medir la respuesta dinámica provocada por la aplicación de una pequeña fuerza axial en la cabeza de un pilote mediante un martillo de mano. Este ensayo es barato y fácil de realizar. Sin embargo, choca con la limitación por la atenuación de la señal, que depende de la esbeltez de los pilotes, L/D y los diámetros.

En suelos blandos, pueden interpretarse bien los registros de pilotes con esbelteces de hasta 30:1 o superiores, mientras que en terrenos más resistentes y rígidos puede haber problemas incluso para esbelteces inferiores a 20:1. La norma francesa limita este tipo de ensayos a esbelteces entre 10 y 30, y aplicables a diámetros de pilotes inferiores a 1,00 m [4]. Por lo tanto, es cuestionable su aplicabilidad para los pilotes habituales para puentes en Chile, los cuáles normalmente se ejecutan en diámetros superiores a 1,00 m y en suelos relativamente rígidos.

Transparencia Sónica ó "Cross -Hole" Sonic Logging (CSL): Este ensayo se ejecuta de acuerdo a la norma ASTM D 6760 y consiste en medir la propagación de una onda de ultrasonido a través del hormigón. Para ello se dejan tubos instalados en el hormigón, normalmente amarrados firmemente a la armadura en su interior, en un número que depende del diámetro del pilote. El ensayo se realiza en cada par de tubos instalados, descendiendo una sonda emisora en uno de ellos, mientras en el otro se desciende una sonda receptora. Una vez que las sondas alcanzan el fondo de los tubos, se elevan ambas en forma sincronizada, mientras la sonda emisora emite un impulso acústico en un determinado rango de frecuencias que es captado por la sonda receptora. La unidad de control del equipo registra las señales y las almacena para su posterior tratamiento y representación. La integridad del hormigón entre fuente emisora y receptor se analiza en base

a dos resultados del ensayo: velocidad de la onda y fuerza de la señal.

Según la norma ASTM, se recomienda instalar un mínimo de 4 tubos para pilotes de diámetro 1,00 m y seis tubos para pilotes de diámetro 1,50 m. La cantidad de tubo varía sin embargo entre las diferentes normas.

La única desventaja que posee este ensayo, es que requiere instalar los tubos antes de decidir la realización del mismo. Según [4] se recomienda dejar tubos instalados en el 100% de los pilotes en obras de importancia o donde las condiciones de ejecución sean difíciles. Luego se pueden realizar más o menos ensayos, de acuerdo a los resultados de los primeros que se seleccionen.

Según [2], este ensayo es el más utilizado actualmente en Estados Unidos para la evaluación de la integridad de pilotes de gran diámetro. Según [4] es el ensayo que corresponde utilizar en pilotes de grandes diámetros (> 1,00 m) y profundidades. En Chile, por el contrario, se ha venido realizando en forma más frecuente el ensayo Eco o Impedancia Mecánica, siendo, como lo indican las recomendaciones, muy cuestionable su capacidad de evaluar correctamente la integridad en los pilotes que normalmente se utilizan en puentes. Como conclusión, se recomienda una mayor utilización del ensayo CSL en el país, cuando se trate de pilotes de diámetros 1,00 m o superiores, y longitudes sobre 20 m.

## 8. Ensayos de carga

La realización de ensayos de carga estáticos en pilotes de gran diámetro es poco frecuente en Chile. Existen antecedentes de ensayos de carga en obras industriales o mineras, pero prácticamente no existen antecedentes de ensayos de carga estáticos en pilotes preexcavados ejecutados para fundación de puentes.

Los ensayos de carga estáticos que se han ejecutado, han sido básicamente de dos tipos:

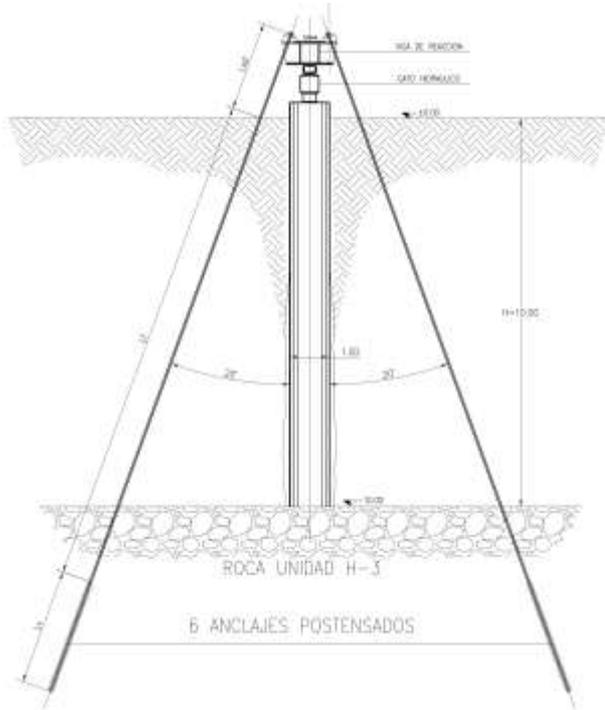
### Ensayo de carga estático "clásico" con carga en cabeza

En este ensayo, se construye una estructura de reacción, conformada normalmente por anclajes al terreno. Dado los altos niveles de cargas que se alcanzan en un ensayo de este tipo, la estructura de reacción que normalmente se utiliza es como la que se muestra en la Fig. 11: se instala una estructura metálica con forma de corona sobre el pilote, a la que se conectan todos los anclajes de reacción. El gato o los gatos hidráulicos se instalan entre corona y pilote.



En la Fig. 12 se muestra el ensayo de un pilote de prueba de 30 m de longitud, diámetro 1,00 m, ejecutado durante la construcción de la Central Bocamina II, en Coronel (2008).

**Figura 11.** Ensayo de carga estático con gato y estructura de reacción en cabeza.



**Figura 12.** Ensayo de carga estático con gato y estructura de reacción en cabeza – Pilotes Terratest – Bocamina II (2008)

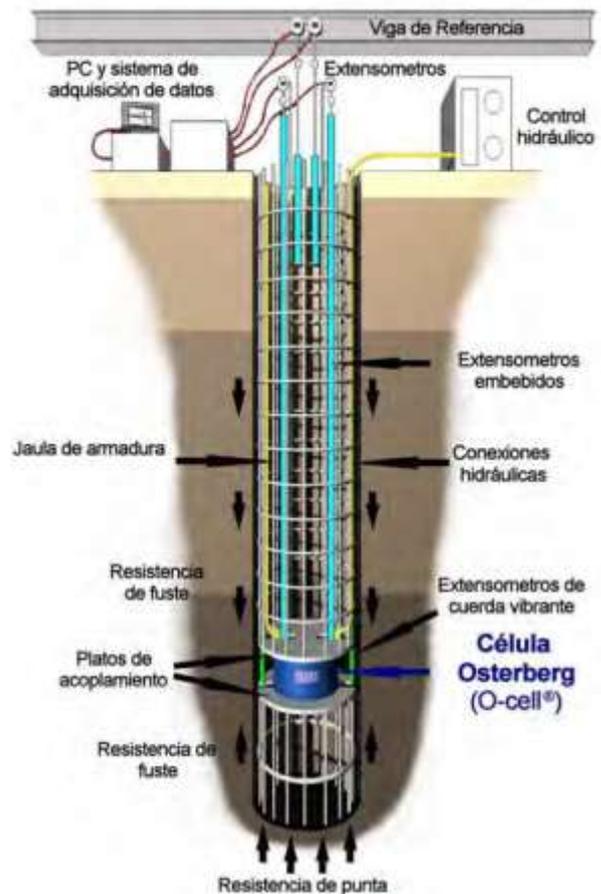


Este tipo de ensayos es muy costoso por la estructura de reacción necesaria, cuando se sobrepasan aproximadamente las 800 a 1000 ton de carga de prueba.

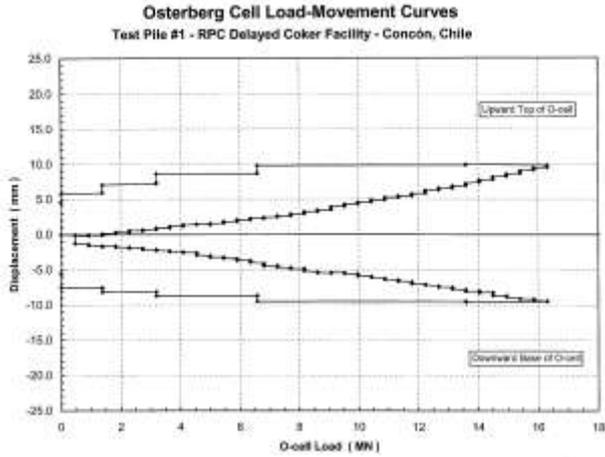
### Ensayo con celda de Osterberg

La celda de Osterberg (Fig. 13) es un dispositivo para ensayar los pilotes con carga estática, mediante un dispositivo (celda) instalado en el cuerpo del pilote, normalmente en la punta. La celda consiste en un cilindro hidráulico, accionado mediante agua, con el que se aplica una carga ascendente y descendente simultáneamente. En Chile se ha aplicado este método en obras industriales o mineras, pero no en obras de puentes. El ensayo de carga con celda de Osterberg de mayor capacidad ejecutado en Chile ha permitido comprobar una carga estática equivalente en cabeza, correspondiente a 3.000 ton!

**Figura 13.** Ensayo de carga con celda de Osterberg



**Figura 14.** Resultado de ensayo de carga con celda de Osterberg – Pilotes Terratest – RPC Concón (2006)



Mediante instrumentación aplicada a lo largo del pilote, es posible medir la carga axial a diferentes cotas durante el ensayo y consecuentemente es posible deducir la resistencia por fuste durante cada escalón de carga. Eso permite conocer la carga de fuste máxima alcanzada en los diferentes estratos y la carga de la punta. En la Fig. 14 se muestra el resultado de un ensayo de carga con celda de Osterberg, ejecutado sobre un pilote de prueba de diámetro 1,20 m, longitud aprox. 49,6 m, en la refinera RPC en Concón (2006). La curva superior representa la deformación ascendente de la placa superior de la celda, y la curva inferior es la curva carga-deformación de la placa inferior de la celda, o sea, de la punta del pilote.

## Referencias

- [1] Norma Europea EN 1536:2011, “Ejecución de trabajos geotécnicos especiales: Pilotes perforados”
- [2] Drilled Shafts: Construction Procedures and LRFD Design Methods, FHWA NHI-10-016 (Mayo 2010)
- [3] Manual de Carreteras, MOP, Vol. N° 5
- [4] Recomendaciones para la ejecución e interpretación de ensayos de integridad de pilotes y pantallas “in situ” – Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) (España)