

Innovaciones y tendencias en la construcción de cimentaciones profundas

Innovations and trends in deep foundations construction

Walter I. Paniagua, Pilotec, S.A. de C.V.

Resumen: Se ilustran algunas ideas para la construcción de cimentaciones profundas, que se empiezan a utilizar en diversos países. Se tocan los temas de procedimientos constructivos, equipos novedosos, control de calidad y exigencias ambientales. La descripción –y el número de temas- no pretende ser exhaustiva, sino meramente descriptiva; finalmente, se vierten algunos comentarios.

Abstract: Some ideas, for deep foundation construction, that are already used in other countries are presented. Issues concerning construction procedures, new equipments, quality control/quality assurance, and environmental matters are treated. The description –as well as the number of topics- does not pretend to be exhaustive; finally, some comments are presented.

1. Introducción

A mediados de los años sesenta, la industria de las cimentaciones profundas parecía ser simple: la elección para una cimentación profunda estaba entre pilotes de madera, de acero H o tubular, y de concreto precolado. Los pilotes se hincaban con martillos de caída libre, de aire, vapor o diesel. La capacidad de carga se determinaba con algún tipo de fórmula dinámica y se confirmaba con pruebas de carga estática.

Los equipos terrestres incluían grúas y esquíes, fig 1. Chellis (1962) muestra, en las cubiertas interiores de su libro, ilustraciones de diversos procedimientos primitivos para el hincado de pilotes. Algunos de estos dibujos muestran una reminiscencia asombrosa con equipos que estaban en uso en los 1960's.

Existían diversos tipos de pilas coladas in situ y cajones; algunos están en uso todavía, con métodos y equipos mejorados.

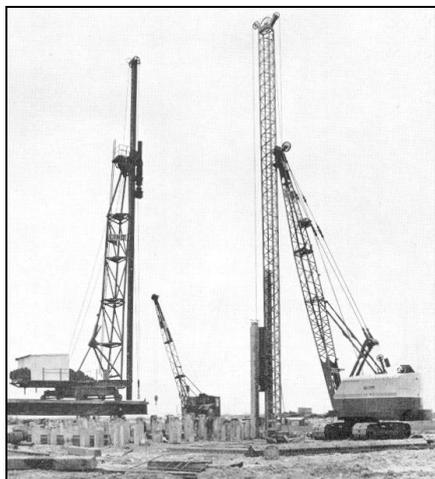


Fig 1.1, Equipos para hincado de pilotes, en los años sesenta

Hoy, para asegurar su supervivencia, un ingeniero constructor de cimentaciones profundas debe mantenerse a la vanguardia de sus competidores en términos de servicio, calidad e innovación. Esto requiere planeación a largo plazo, una idea que parece anticuada actualmente.

La innovación en la construcción de cimentaciones profundas en México parece importarse de Europa: martillos diesel e hidráulicos, vibrohincadores, perforadoras y diversas técnicas de perforación. Los constructores que usan tecnología moderna son ingenieros mexicanos que usan tecnología importada o compañías extranjeras que radican en el país.

Los cambios en la industria se suceden lentamente, pero suceden. Un constructor que utiliza equipos y procedimientos antiguos, puede competir con la tecnología nueva debido al alto costo de ésta última. Esto no puede durar para siempre, dado que los constructores están invirtiendo en nueva tecnología y esta tendencia continuará.

Como una muestra del proceso de cambio que se vive en el mundo, en este trabajo se presentan algunas ideas que se han empezado a utilizar en otros países; inclusive, algunas han empezado a llegar a México.

Se trata en forma descriptiva los siguientes temas: procedimientos constructivos, equipos de construcción novedosos, control de calidad, y requerimientos ambientales.

Finalmente, se dan algunos comentarios, con el propósito de incentivar el ingenio y la imaginación características de los profesionales mexicanos involucrados en la industria de las cimentaciones profundas.

2. Procedimientos constructivos

2.1 Descabece de pilas

Es usual la demolición de la parte superior de las pilas y pilotes, para integrarlos –generalmente mediante un cabezal- al resto de la estructura o de la cimentación. Para ello, se ha utilizado comúnmente equipo neumático (pistolas de aire comprimido). Existen diferentes maneras de realizar este trabajo en forma más eficiente, y con menor riesgo para los trabajadores:

Rompedor de pilotes (Pile breaker, 2008). Equipo denominado PB (Pile Breaker, por sus iniciales en inglés) que involucra una serie de gatos hidráulicos, que rodean el elemento por demoler, fig 2.1, para secciones entre 15 y 60 cm, para pilotes precolados, y entre 40 y 180 cm de diámetro para pilas. Cabe señalar que ambos equipos se utilizan acoplados al sistema hidráulico de otro equipo base, como una retroexcavadora. Además, dejan el acero de refuerzo sin daños.

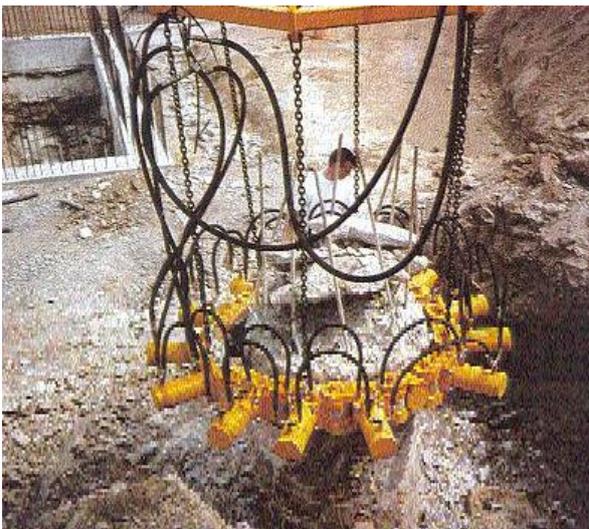
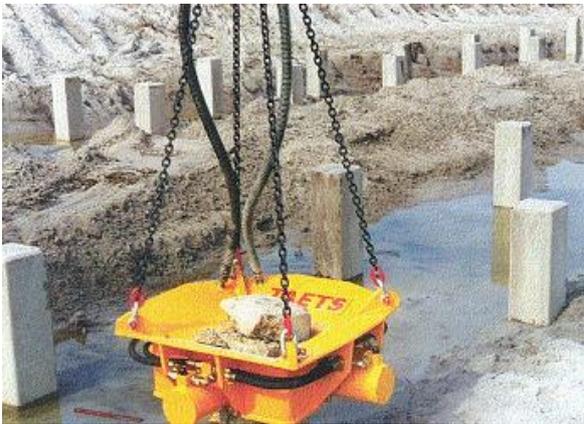


Fig 2.1, Equipos PB para descabece de pilotes y pilas

Brocales prefabricados (Cementation-Skanska). Los sistemas de pilas secantes o tangentes requieren de un alineamiento preciso, por lo cual se les coloca un brocal

temporal, que es demolido posteriormente (Paniagua, 2002). Una opción es utilizar brocales prefabricados de concreto, para prevenir la contaminación de la porción superior de las pilas, y evitar la demolición posterior. La operación se inicia colocando el brocal prefabricado; posteriormente la perforación se realiza a través del brocal de concreto, y se coloca el concreto hasta el nivel inferior de lo que hubiera sido el descabece, fig 2.2.



Fig 2.2, Utilización de brocal prefabricado, para la construcción de pilas secantes

Sistema de cuña (Elliott). Esta técnica se utiliza en pilas y consiste en aislar el acero de refuerzo que servirá de traslape con el dado de cimentación, con unas fundas de plástico, para evitar la adherencia del acero con el concreto. Se coloca el acero de refuerzo y el concreto en forma tradicional. Una vez que se adquiere resistencia en el concreto, se perfora horizontalmente un barreno de 51mm de diámetro en la pila, al nivel que se desea descabezar, a una distancia de un poco más del centro de la pila. Se coloca un espaciador en el barreno,

provocando una grieta a lo largo de la sección deseada, rompiendo el concreto. Finalmente, se levanta el residuo de concreto con una oreja que se ha dejado previamente en la superficie, fig 2.3.



Fig 2.3, Descabece de pilas con el sistema de cuña

Sistema de inyección (Receptieux). En este sistema, la formación de la grieta que provoca la separación del concreto no deseado, la provoca una inyección expansiva. El acero de refuerzo se aísla del concreto de manera similar al sistema anterior. Por otro lado, se

prepara una serie de tubos de PVC que se conectan a unos conos de plástico en la parte inferior; este sistema se inserta dentro del concreto fresco. La temperatura del concreto se verifica continuamente, dado que es un factor determinante para la selección de la mezcla de inyección. Al alcanzarse el punto deseado, se vacía la mezcla dentro de los tubos y conos, con ayuda de un embudo. La mezcla se expande en los conos, al nivel de corte deseado, provocando una grieta horizontal en la pila. La porción no deseada de concreto se retira con ayuda de una grúa, fig 2.4.

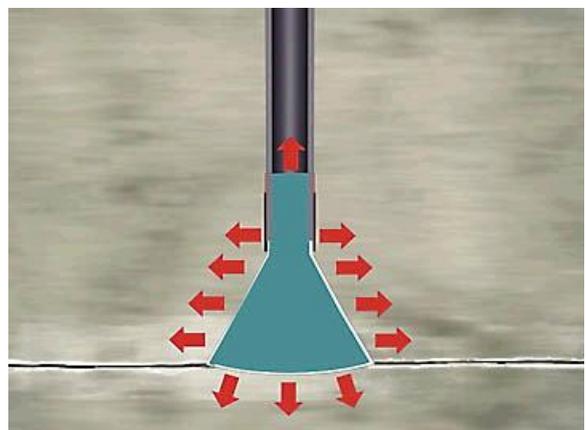


Fig 2.4, Descabece de pilas con el sistema de inyección



Fig 2.4 (cont.), Descabece de pilas con el sistema de inyección

2.2 Instalación de columnas-pila

Frecuentemente se instalan columnas prefabricadas en las pilas de cimentación, para una construcción “arriba-abajo”. Estructuralmente, generalmente son largas, esbeltas, que soportarán cargas importantes, por lo que la precisión en su posicionamiento en planta y verticalidad es delicada.

Se han desarrollado una serie de mecanismos para controlar la instalación de estos elementos, buscando una tolerancia de $\pm 25\text{mm}$ y una verticalidad de 1/150.

Los sistemas más modernos (fig 2.5) cuentan con mecanismos hidráulicos que permiten ajustar la posición de la columna, permitiendo que se pueda colocar el concreto con el sistema tremie, o bien colocar la columna después de vaciar el concreto en la pila.

2.3 Hincado poco convencional

Una solución original para la construcción de un puente claro por claro (en este caso de 36.6m), consiste en un equipo capaz de hincar los pilotes presforzados (39 m largo, 76 cm de lado, 44 t peso) desde el mecanismo que lanza las traves, además de construir los cabezales, izar las traves y colar la cubierta. La secuencia de hincado es la siguiente, figs 2.6 y 2.7:

- Se lanza la armadura con gatos hidráulicos hasta quedar en voladizo en la posición aproximada del siguiente claro.
- El martillo y el pilote se cargan con una grúa viajera
- La guía se gira hasta quedar en posición vertical
- La armadura se posiciona longitudinal y lateralmente, a la posición de hincado del pilote
- Se hinc el pilote
- La armadura se gira hasta la posición horizontal, se mueve lateralmente a la posición del siguiente pilote; se carga un nuevo pilote y la operación se repite



Fig 2.5, Mecanismo para la instalación de columnas en pilas de cimentación (Mitchell, 2008)



Fig 2.6 Guías de hincado, pilote y martillo



Fig 2.7 Armadura en posición; pilote y guías girando a posición vertical

3. Equipos novedosos

3.1 Martillo sin vibración

La instalación de pilotes y ademes se dificulta con las restricciones de vibraciones en estructuras aledañas al hincado. Una solución a este problema es el uso de martillos vibratorios de alta frecuencia; el equipo en la fig 3.1 es capaz de excitar un pilote o ademe hasta su frecuencia de resonancia (hasta 150 Hz o 9000 rpm), para producir nieles de aceleración fuerza y desplazamiento elevados (Janes, 2008).

La comparación directa con martillos convencionales es de menos de 1/50 de la vibración, con valores de hasta 1 cm/s a una distancia de un diámetro del pilote.



Fig 3.1, Martillo vibratorio resonante de 200 Hp y pilote de tubo de 60 cm de diámetro

El equipo usa un mecanismo de pistón-cilindro para generar la excitación, diferente de los sistemas convencionales que utilizan masas excéntricas. Este sistema utiliza vástagos rotatorios en el interior del martillo.

3.2 Construcción de pilas de hélice continua con ademe

Tradicionalmente, las pilas secantes se construyeron como pilas ademadas con ademes reforzados de doble pared con unidos con conexiones rápidas. Una de sus funciones es mantener la pila razonablemente vertical.

Al evolucionar los equipos y técnicas de hélice continua, la construcción de las pilas secantes se volvió más común con estos equipos. A su vez, los muros elaborados con este método se han vuelto más esbeltos, resultado de un diseño más agresivo; la flexibilidad de las brocas de menor diámetro se desvían frecuentemente de la tolerancia, dejando huecos entre las pilas.

En los últimos diez años, los fabricantes de equipo han buscado solucionar el problema ademando las perforaciones con hélice continua. Se ha cumplido con el objetivo primordial, pero se ha generado otro problema, dado que el corte de la perforación sale en la parte superior del ademe, a varios metros de la plataforma de trabajo.

En la Fig 3.2 (Puller, 2008) se muestra un equipo que soluciona este problema. La hélice continua se encuentra dentro del ademe en la parte derecha de la perforadora, y el ademe y la broca se colocan juntas, alternadamente. El suelo producto de la perforación que se derrama de la parte superior del ademe se recupera en una trompa de elefante telescópica que se muestra a la izquierda de la fotografía. Este tubo se maniobra con un malacate de servicio, para mantener la descarga cerca de la superficie del suelo. Este método permite conservar tolerancias en la vertical del orden de 1/200.

3.3 Perforación sónica

Este sistema emplea vibraciones mecánicas de alta frecuencia, para cortar suelos y formaciones de roca, así como instalar ademes en el suelo. El término “sónico” se utiliza por que con esta técnica la tubería de perforación vibra a una frecuencia entre 50 y 150 Hz, que se encuentra en el límite inferior de las vibraciones sonoras que pueden ser percibidas por el oído humano. Esta frecuencia se considera “alta”, comparada con otros mecanismos utilizados en la industria de la perforación.

Adicionalmente, se aplica rotación en la broca, para distribuir la energía uniformemente, y desgastar la broca en toda la cara.



Fig 3.2, Perforadora de hélice continua, con instalación de ademe metálico y mecanismo para descarga de suelo producto de perforación

Las perforadoras sónicas se asemejan y operan parecido a las perforadoras convencionales. La principal diferencia es que la primera tiene una cabeza de perforación (oscilador) operada hidráulicamente, que genera las fuerzas de vibración de alta frecuencia. La cabeza de perforación se conecta directamente con la tubería de perforación, transmitiendo la vibración a través del acero, hasta la broca, causando fracturamiento, corte o desplazamiento en el suelo o roca.

Con este sistema se pueden perforar diámetros entre 89 y 318 mm, apropiados para instalar anclas, micropilotes, perforaciones para inyección, entre otros (Davis, 2006). El sistema de perforación tiene una frecuencia de operación variable, para buscar la resonancia con el suelo que está perforando; al cumplirse esta condición, puede alcanzar velocidades de perforación de hasta 30 cm/s.

En la fig 3.3 se muestran equipos para perforación sónica.



Fig 3.3, Equipos para perforación sónica; montado sobre camión, y montado sobre orugas

4. Control de calidad

En general, aunque es preferible llevar a cabo el control de calidad durante la construcción de cimentaciones profundas, en ocasiones es necesario implementar procedimientos de aseguramiento de calidad. Los métodos de prueba no destructivos para cimentaciones profundas son ensayos indirectos, que en situaciones complicadas no proveen información completa, y es necesario complementarlos con ensayos adicionales y/o análisis. Los métodos directos implican un proceso de destrucción, dado que significan la extracción del pilote.

4.1 Métodos no destructivos

Los métodos no destructivos para el aseguramiento de calidad de cimentaciones profundas más comunes son a) medición con pozos cruzados (Cross-Hole Sonic Logging, CSL), y b) prueba de integridad (Low Strain Testing, LST). Hay elementos comunes que afectan este tipo de ensayos, como la experiencia del personal que realiza el ensayo, la confiabilidad de las mediciones, contar con la documentación completa de los registros de construcción.

Es posible clasificar los resultados de las pruebas de integridad, desde un punto de vista cualitativo (Rangel et al, 2006):

- A- Pila aceptable; el registro es claro
- B- Pila mala; el registro contiene indicaciones claras de un reflejo importante, producto de un posible defecto arriba de la punta de la pila
- C- Pilote continuo, pero con algunos defectos; la señal de la punta es aparente. En general, es necesario mayor análisis.
- D- Registros dudosos; no se observa la señal de la punta o no es posible identificarla, por que la condición en la porción superior produce señales que generan ruido en la reflexión de la onda

Durante la construcción, los procedimientos para el control de calidad son:

Pilotes hincados. El registro del número de golpes es un instrumento eficaz en esta etapa; por ejemplo, una disminución en el número de golpes, puede indicar un defecto estructural. También son comunes las pruebas dinámicas de carga (High Strain Test, HST). Además, los pilotes de tubo de boca cerrada se pueden inspeccionar visualmente después de su hincado.

Pilas. La inspección de pilas en forma directa es posible únicamente en diámetros grandes; además, si se construyen bajo lodo, no es posible llevarla a cabo. El registro de construcción de la pila es una fuente de valiosa información respecto del volumen colocado.

Recientemente se ha desarrollado tecnología basada en los principios del sonar, para determinar la forma del fuste, el volumen de la pila y su verticalidad (Kort et al, 2007).

El equipo consiste en un transmisor sonar, montado en una cabeza lastrada, que se baja a la perforación, fig 4.1. Al subir el dispositivo, el tiempo entre el envío y la recepción de la señal se utiliza para determinar la distancia de la cabeza a un punto del fuste o la base. El análisis de todo el registro indica las variaciones del centro a la pared de la pila, para todo el fuste de la misma. Dependiendo de la potencia del transmisor, y la densidad del lodo de perforación, es posible medir con precisión pilas de hasta 3.6m de diámetro. El tiempo para perfilar una pila de 30m de profundidad es entre 15 y 20 minutos.

Operando convencionalmente, al posicionar la cabeza del dispositivo a distintas profundidades, se realiza una medición en 360°, generando un anillo a cada profundidad, que genera el perfil de la pila. El software se utiliza para determinar el centro geométrico de cada anillo, que se compara con un anillo de referencia en la superficie, fig 4.2.

Rausche et al (2008) proponen un procedimiento para el control de calidad de cimentaciones profundas:

Pilotes hincados

I. Pilotes de producción de obras con menos de 50 pilotes, o pilotes testigo en obras más grandes

1. Pruebas estáticas o dinámicas. La prueba dinámica debería realizarse después de que se haya reconsolidado el suelo después del hincado.
2. Si se alcanza menos del 90 % de la capacidad última, repetir la prueba después de hincar el pilote una profundidad adicional, o utilizar un pilote de prueba nuevo.
3. Se debe establecer un criterio de instalación de pilotes de producción, usualmente el registro con el número de golpes, y el criterio de rechazo, cuando aplique.
4. Para pilotes de concreto, o pilotes de tubo rellenos de concreto, de longitud de menos de 60 veces el lado del pilote, adicionalmente se pueden utilizar pruebas de integridad.



Fig 4.1, Calibrador sónico

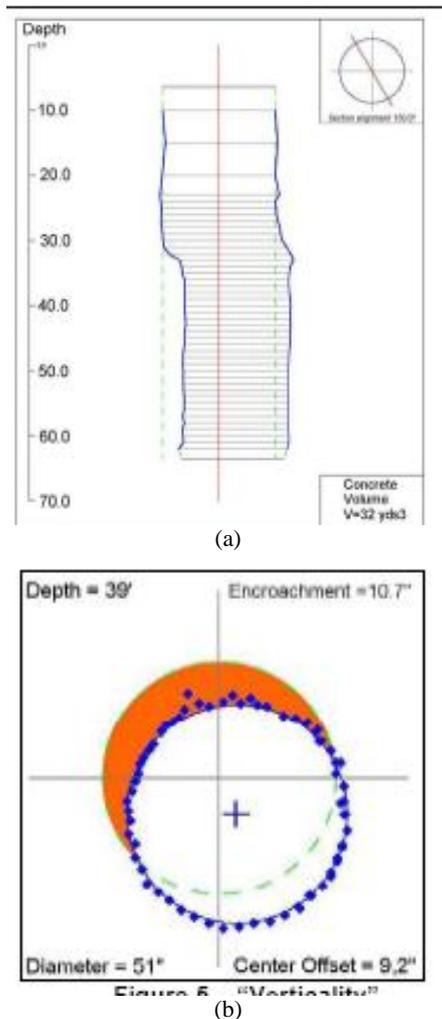


Fig 4.2, a) Perfil en 2D del fuste de la pila; b) Planta del desplazamiento de la pila

II. Pilotes de producción en obras grandes

- Si es posible realizar pruebas de integridad, llevarlas a cabo en el 10 % del total; realizar pruebas adicionales en los pilotes de categoría D. Si el número total de pilotes en las categorías B y C es mayor del 20 % del número total de elementos ensayados, se debe incrementar el porcentaje de pilotes probados. Los pilotes de categoría B o C deben ser verificados con pruebas de carga dinámica.
- Si no es posible realizar pruebas de integridad, ejecutar pruebas dinámicas en cuando menos 5 % del total.

III. Si las condiciones de los pilotes de producción difieren significativamente de las condiciones de los pilotes de prueba, será necesario realizar pruebas de carga dinámica en esos pilotes.

Pilas

I. Llevar un registro de construcción que incluya los volúmenes y tiempos de colado

- Pruebas de carga estática, de acuerdo con las especificaciones
- Pilas con diámetro mayor de 60cm, prepararlas para ensayos de pozos cruzados; pilas con diámetros menores, con preparación para ensayo down-hole.
- Calificar las pilas de prueba con pruebas de integridad.
- Establecer el método más adecuado a la obra: pruebas de integridad, pozos cruzados, etc.
- Para obras grandes, correlacionar pruebas dinámicas con pruebas estáticas en pilas de prueba.

II. Para pilas de producción

- Pruebas en las primeras cinco pilas, y adicionalmente, en 5 % de todas las pilas.
- Si se obtienen registros tipo B en más del 33 %, se llevan a cabo pruebas adicionales
- Si se obtienen registros tipo C o se observan anomalías en más del 33 %, es necesario revisar el diseño de la pila o llevar a cabo pruebas adicionales para aceptar o rechazar la pila

4.2 Extensómetros recuperables

En pruebas de carga estática axiales de compresión o tensión, en ocasiones se colocan instrumentos para medir las deformaciones del fuste de la pila a lo largo de la misma; para este propósito, es posible utilizar extensómetros mecánicos (tell-tales), o bien strain gages adheridos al acero de refuerzo o embebidos en el concreto. En estos casos, se coloca un juego de instrumentos en cada nivel en el que se desea medir la deformación.

Una alternativa a este sistema, es la colocación de un solo tubo dentro de la pila, y una línea que incorpora varios extensómetros electrónicos dentro del tubo metálico o de PVC, que se recuperan al final de la prueba (Bustamante et Gianceselli, 2001; Geokon, 2007).

Los extensómetros se arman en el exterior, y se insertan posteriormente en el tubo; se fija neumáticamente cada uno, y permanecen expandidos durante el período de mediciones. Al término de la prueba, se libera la presión, lo que retrae los pistones y permite la extracción de los instrumentos. El principio de operación se muestra en la fig 4.3. En la fig 4.4 se

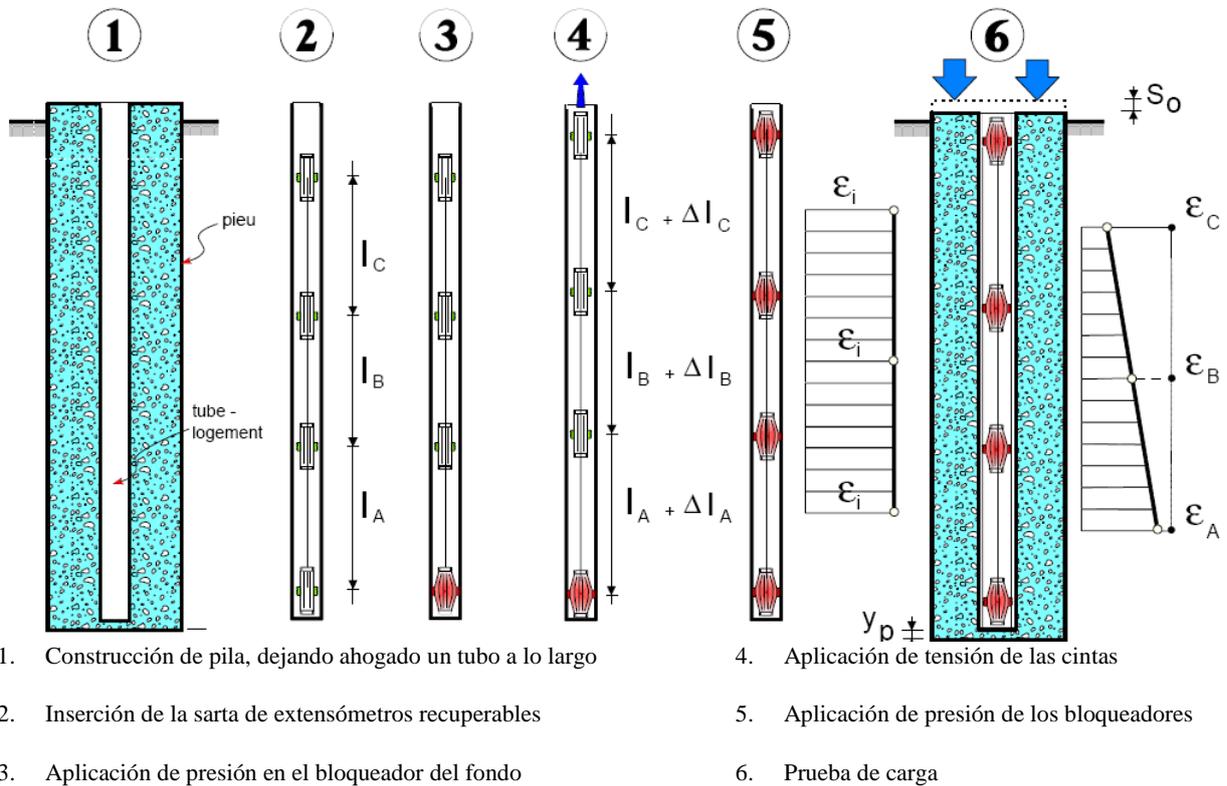


Fig 4.3, Principio de operación de los extensómetros recuperables en una prueba de carga (Michel et Gianceselli, 2001)



Fig 4.4, Extensómetros recuperables: Geokon y LCPC

muestran los extensómetros recuperables, y en la fig 4.5 un ejemplo de las curvas de deformación vs profundidad, para diferentes niveles de carga.

4.3 Inspección de ampliaciones de base (campanas) en pilas

En suelos de consistencia firme y/o compacidad media a alta, donde no se encuentra el nivel freático, es una práctica común efectuar ampliaciones de la base de la pila (campanas), para incrementar la capacidad de carga por punta, y reducir la colocación de acero y concreto (Paniagua, 2001). Generalmente, estas campanas se construyen con herramientas diseñadas para este objeto,

y se inspeccionan visualmente al final de su excavación, para lo cual una persona desciende al fondo de la pila, con el consecuente riesgo implicado.

Para evitar esta operación, se ha diseñado un equipo (Stansfield et al, 2001) que permite la inspección de toda la campana con una cámara de circuito cerrado de TV, y verifica el grado de alteración del suelo de la base de la pila, con ayuda de un penetrómetro. Este equipo mejora el control de calidad, ya que evita la subjetividad de una inspección visual, además de resolver el problema de seguridad del personal.

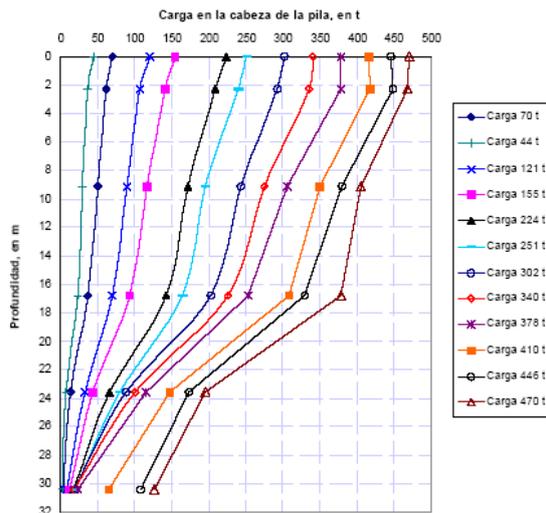


Fig 4.5, Curvas de deformación-profundidad, para diferentes niveles de carga en prueba de carga estática de pila (Ibarra et al, 2008)



Fig 4.6, Equipo para la inspección del fondo de las pilas y campanas

5. Exigencias ambientales

En este aspecto, la construcción de cimentaciones ha empezado a solucionar algunos problemas, pero hay ciertos temas que han empezado a tratarse (Paniagua, 1991).

En otros países, las autoridades han incrementado dramáticamente el costo de la disposición de materiales de construcción y suelos producto de perforación y excavación. En México, estos lineamientos se empiezan a tomar en sitios específicos, como en Cancún y la Riviera Maya, o la ciudad de México. Algunos aspectos son:

- Hoy en día, es necesario disponer apropiadamente de combustibles, aceites, grasas.
- Se han incrementado los esfuerzos para mejorar las plantas de tratamiento de lodos, con ayuda de desarenadores. Los polímeros se utilizan para perforar cuando es posible.
- Hay una tendencia generalizada a utilizar cada día más las pilas construidas con hélice continua, o los pilotes de desplazamiento parcial o total; algunos ejemplos se muestran en la tabla 5.1. Estos pilotes requieren de una mayor potencia para su instalación, por lo que el balance en sustentabilidad todavía tiene que demostrarse. Son de mayor utilidad en sitios donde es difícil y costoso disponer del material producto de perforación. Este tipo de pilote presenta un potencial de soluciones con una variedad más amplia de la que se utiliza actualmente.

Algunos de los pilotes mencionados en el punto anterior, incrementan la capacidad de carga por fricción, dejando roscas o costillas en la interfase suelo-pilote, fig 5.1. El incremento en la capacidad por fricción reduce las dimensiones del pilote para una carga específica. Esto conduce a un menor volumen del producto de perforación, pero también al menor consumo de materiales permanentes, como acero y concreto, incluso en los dados de cimentación.

6. Comentarios

Contratos

Los problemas de cimentación son la causa de disputas que más demandas provoca en la ciudad de Nueva York (Silverman, 2008); al estar en la ruta crítica de la construcción de la obra, si hay problemas, los retrasos y costos se repercuten en todo en proyecto. La razón potencial del conflictos es que habrá condiciones del suelo inesperadas. Los problemas más comunes son:

- Agua de cualquier tipo
- Roca. Ya sea que hay más o menor cantidad de roca, o diferente de la esperada
- Obstrucciones naturales o hechas por el hombre

Una causa menos común es encontrar una solución geotécnica inadecuada.

Tabla 5.1, Datos generales de sistemas de pilotes de desplazamiento, (Paniagua, 2006).

Pilote / Técnica	País	Desarrollador – Contratista*	Par de torsión kNm	Diámetro mm	Longitud max m
<i>Primera Generación</i>					
Atlas	Bélgica	Franki		460-660	
De Waal	EU	Morris Shea			
Franki VB	Alemania				
Fundex	EU	American Pile Driving		450-670	25-35
<i>Segunda Generación</i>					
Screw injection	Holanda	Funderingstechnick		110-550	
SVB	Alemania	Jebens		400-670	< 24
SVV	Alemania	Jebens		440	< 20
Tubex	EU	American Pile Driving			
<i>Tercera Generación</i>					
APGD	EU	Berkel		350-460	< 23
Displacement	Alemania	Bauer	250	600	22
Screw pile	Reino Unido	Cementation		300/600	
Soil displacement	Reino Unido	Cementation			
Discrepile	Italia	Trevi	> 200	300-750	25-30
Omega	Bélgica	Socofonda			
T.	Francia	Soletanche-Bachy			
TSD	Reino Unido	May Gurney		300-600	25

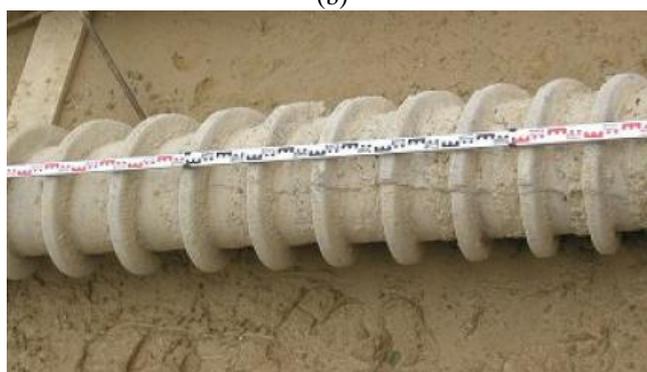
Nota:* El inventor del sistema o el propietario de los derechos



(a)



(b)



(c)

Fig 5.1, Geometría de los pilotes de desplazamiento: a) Atlas, b) Olivier, c) T

6.2 Desarrollo a futuro

Ambiente y sustentabilidad. La tendencia global es reducir el consumo de materiales de construcción permanentes, minimizar el desperdicio y el suelo producto de perforación o excavación, así como la energía utilizada en la construcción. Estos factores serán

clave para seleccionar un sistema de cimentación en el futuro.

Se prevé un mayor desarrollo del mejoramiento masivo de suelos, suelos mezclados en el sitio (soil mixing) y estructuras de contención flexibles.

La reutilización de los materiales puede implementarse casi de inmediato; por ejemplo, el uso de concreto triturado en lugar de grava para inclusiones o concreto de resistencia media.

La posible contaminación debida a lodos de perforación, mezclas de inyección y aditivos en general, obligarán a cambiar este tipo de prácticas, que se verán disminuidas paulatinamente.

Concreto. Las mezclas para fabricar concreto se han mejorado sustancialmente en los últimos 20 años; sin embargo, las prácticas sustentables requerirán concretos con mayores esfuerzos de trabajo, y que reduzcan el contenido de cemento, tanto como sea posible (la fabricación de cemento es una de las mayores fuentes de contaminación).

Para los elementos colados en el lugar, es probable que se explore con mayor intensidad el uso de fluidificantes y plastificadores, que ayudarán a reducir el contenido de cemento y mejorar las resistencias de trabajo del concreto.

Mezclado en el lugar. Ha habido avances sustanciales en esta técnica, como el jet grouting y el CSM (Guiot y Paulín, 2008). El desarrollo en esta dirección indica importantes mejoras en la sustentabilidad y el ambiente.

Control de la colocación del concreto. La medición de la presión del concreto en la tubería tremie o en una hélice continua ha sido implementado, pero con algunos problemas por resolver aún; por ejemplo, la presión en el concreto de pilas coladas con hélice continua se mide en el codo que se encuentra en la parte superior de la hélice. En el caso de la tubería tremie, sería muy útil contar con registro continuo de la longitud embebida en el concreto fluido, durante el colado.

Es difícil prever un futuro promisorio a constructores que necesitan un convoy de camiones y un día o más para ensamblar sus equipos, cuando sus competidores pueden tener su equipo descargado e instalando pilotes en mucho menor tiempo. Este mismo ejemplo es aplicable a otras áreas de las cimentaciones profundas, todas ligadas a la productividad, calidad y seguridad.

Podemos afirmar que los pilotes hincados estarán con nosotros en un futuro previsible; estos pilotes conllevan menos riesgos que otras alternativas, por lo que le resultan más confiables y entendibles a todos los participantes en el proceso de construcción, lo que se traduce en menos problemas.

La construcción de pilas coladas en sitio se ha visto beneficiada con diversos equipos, para la perforación, el control de calidad, lodos y otros. Sin embargo, se han desarrollado alternativas a las pilas y/o pilotes convencionales: el mejoramiento masivo de suelos toma

un mayor segmento de mercado, así como los pilotes de desplazamiento u otras variantes.

Los vibrohincadores se han utilizado por muchos años, y en algunos proyectos incluso para instalar pilotes de carga. Se requiere investigación para predecir la capacidad de carga con este procedimiento, pero se trabaja en ello.

En resumen, el cambio es inevitable. La pregunta es cuándo y qué tan rápido. El futuro cercano producirá muchas innovaciones que no son obvias para nosotros ahora.

Referencias

Bustamante M. et Gianceselli L. (2001) La mesure des déformations a l'aide des extensometres amovibles LPC. Méthode d'essai LPC N° 34, Laboratoire central des ponts et chaussées.

Chellis, R.D. (1962) "Pile Foundations", John Wiley & Sons, New York.

Davis J.P. (2006) "Sonic drilling offers quality control and non-destructive advantages to geotechnical and construction drilling on sensitive infrastructure sites". DFI 31st Annual Conference on Deep Foundations, Washington, D.C., USA.

Guiot P. y Paulín J. (2008) "Tendencias en la construcción especializada en geotecnia". Memorias de esta reunión.

Ibarra E., Paniagua W.I., Mendoza M.J. y Ovando E. (2008) "Prueba de carga en pila instrumentada, al Oriente del Valle de México", XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Aguascalientes, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.

Janes M. (2008) "The resonant driver: ultra high frequency pile and casing installation". DFI 33rd Annual Conference on Deep Foundations, New York, USA.

Kort D.A., Hayes J.A. and Hayes J.S. (2007) Sonar caliper of slurry constructed drilled shafts – providing quality assurance and quality control in deep foundations. DFI 32nd Annual Conference on Deep Foundations, Colorado Springs, USA.

Sherwood D. (2008) "Review of major developments in ground engineering over the last 20 years and current trends", DFI 33rd Annual Conference on Deep Foundations, New York, USA.

Paniagua W.I. (1991) "Cimentaciones profundas y medio ambiente", Simposio Geotecnia y Medio Ambiente, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.

Paniagua, W.I. (2000) "Construcción", capítulo 5 del *Manual de Cimentaciones Profundas*, editado por la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.

Paniagua W.I. (2002) "Tablestacas", Cap. 4 del Manual de Construcción Geotécnica, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.

Paniagua W.I. (2006) "Construction of Auger Cast In Place and Drilled Displacement Piles", Simposio Inclusiones Rígidas en Suelos Blandos Difíciles, organizado por la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.

Puller D.J. (2008) "Improved secant piled wall construction". Geodrilling 2008 Conference.

Rangel J. L., Paniagua W. I. e Ibarra E. (2006) "Evaluación de la integridad estructural en cimentaciones profundas mediante pruebas de pulso combinado", XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, editada por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.

Rausche F., Likins G. and Liang L. (2008) "Challenges and recommendations for quality assurance of deep foundations", DFI 33rd Annual Conference on Deep Foundations, New York, USA.

Silverman J.M. (2008) Below the surface, Seminar held by McCarter & English Construction Law Group, New York.

Stansfield L. and Nicholson D.P. (1998) "Recent developments in the construction of under-reamed piles in London Clay: remote inspection and testing allows continued use of cost effective under-reamed piles at Covent Garden". Seminar Proceedings: The Value of Geotechnics in Construction, Institution of Civil Engineers, London, UK.