

# **Sobre el Procedimiento Constructivo de Pilas de Cimentación**

Walter I. Paniagua Zavala, Pilotec, SA de CV

Abstract: The importance of drilled shafts in the deep foundation industry is noted. A practical graph is proposed to select the capacity of the drilling equipment, based on the hole diameter, and the soil-rock characteristics. Several examples are included, with qualitative solutions for construction procedures of drilled shafts in different conditions, outlining the stability of both wall and bottom of the hole.

Resumen: Se destaca la importancia que ocupan las pilas en la construcción de cimentaciones profundas en México. Se propone un gráfico para la selección del equipo de perforación de pilas, con base en el diámetro de perforación, así como las características del material por perforar. Se incluyen ejemplos de soluciones cualitativas de procedimientos constructivos para estos elementos, en diferentes condiciones estratigráficas, destacándose los relacionados con la estabilidad de las paredes y del fondo de la perforación.

## **1. Introducción**

La selección apropiada del tipo de cimentación profunda es una de las decisiones más importantes y es preferible hacerla con base en la experiencia previa en suelos similares. Las ventajas y desventajas de diversos procedimientos constructivos pueden afectar la selección del tipo de cimentación para cualquier proyecto. La selección del tipo de cimentación profunda depende de (Bottiau, 2006):

- Factores geológicos y condiciones del suelo
- Factores históricos locales
- Costumbres de construcción locales

En la Figura 1, se muestra el uso de los diferentes sistemas constructivos alrededor del mundo. Se pueden hacer los siguientes comentarios:

- Los pilotes hincados se siguen utilizando, aun con las restricciones cada vez más estrictas, en cuanto a ruido y vibraciones en zonas urbanas. Se han desarrollado alternativas para hincado sin vibración (pilas de desplazamiento, pilotes metálicos helicoidales o hincado a presión). Es una solución particularmente utilizada en suelos blandos.
- El hincado de pilotes con vibración tiene menor uso, a pesar de los avances en los equipos de construcción.
- Las pilas de desplazamiento han ganado terreno, pero su aplicación está limitada en gran medida a ciertas zonas de Europa, aunque también se usan en Norteamérica y Sudamérica.
- Las pilas siguen siendo el sistema más usado, especialmente cuando se encuentran condiciones del suelo difíciles o heterogéneas. En este grupo se pueden incluir las pilas de hélice continua.

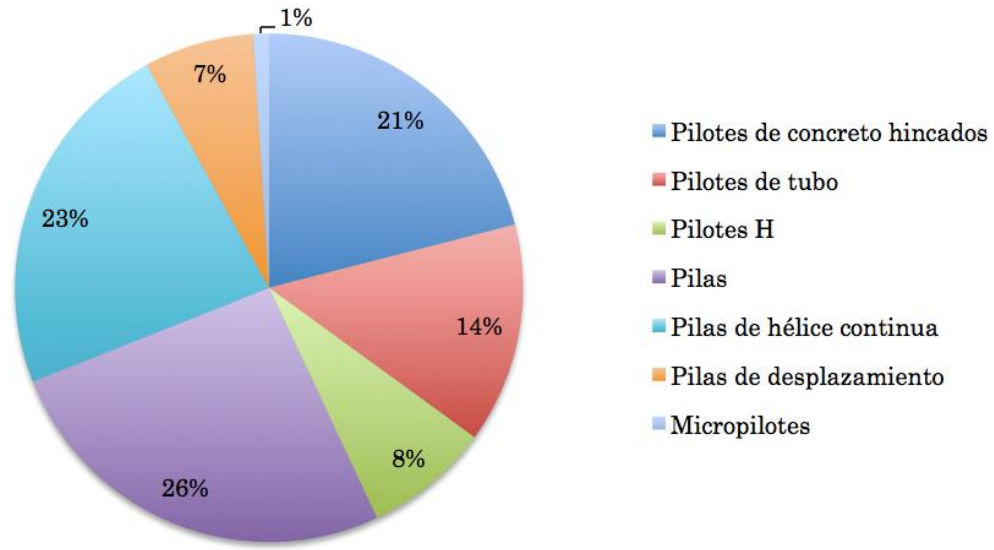


Fig. 1 Mercado de las cimentaciones profundas en el mundo, modificado de Bottiau (2006).

Sin embargo, en México el sistema más común es el de Kelly, para el que se presentan algunos ejemplos del procedimiento constructivo; cabe señalar que todos los ejemplos incluidos y sus soluciones son reales.

## 2. Selección de equipo de perforación

Los factores que intervienen en la selección del equipo y procedimiento son:

**Circunstancias del proyecto.** Las condiciones que prevalecen, como un entorno urbano, entorno marino, limitaciones de espacio, entre otros, Figura 2.

**Características del proyecto.** Distribución de pilas, geometría (diámetro, longitud), número de pilas.

**Características del suelo.** Variaciones estratigráficas, variaciones espaciales, nivel de agua freática, compacidad o consistencia, boleas (número, diámetro), roca (resistencia a la compresión simple, RQD).

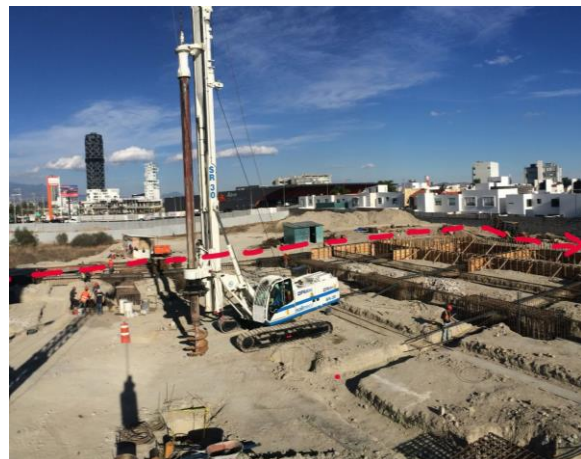




Fig. 2 Diferentes entornos de construcción de pilas de cimentación.

Para la productividad en la construcción, destacan tres puntos:

*Operación.* La operación de los equipos de construcción constituye un factor de gran importancia en la productividad. En efecto, un operador calificado y con destreza y pericia generará una mayor eficiencia, seguridad, calidad, así como menor mantenimiento y desgaste del equipo. Además, se señala la importancia de la capacitación del operador del equipo. Sin embargo, los detalles de este aspecto están fuera del alcance de este trabajo.

*Herramienta de perforación.* La selección de la herramienta de perforación es una función directa del suelo o roca que se desea perforar. Paniagua (2017) presenta una diversidad de opciones, dependiendo de las diferentes condiciones estratigráficas.

*Selección de equipo.* Tomando en cuenta los factores mencionados, se propone utilizar la Figura 3, con el siguiente procedimiento:

- Se selecciona el diámetro de la pila, en el eje horizontal.
- Se selecciona la condición de suelo o roca más desfavorable a lo largo de los perfiles estratigráficos en el sitio de los trabajos, en el eje vertical.
- Se determina la capacidad del equipo de perforación, dependiendo de la zona en la que se intersecten las líneas horizontal y vertical, de acuerdo con los puntos anteriores. La capacidad está definida en términos del par de torsión del equipo de perforación.

A manera de ejemplo, se plantea perforar pilas de 130 cm de diámetro, con un desplante en presencia de boleos y roca, de hasta 20MPa de resistencia a la compresión simple; el resultado es un equipo de 200 kNm de par de torsión. Se hace notar que esta perforación también es posible realizarla por etapas, ejecutando inicialmente un diámetro más pequeño, e incrementándolo gradualmente en dos o tres pasos. Por supuesto, esta condición disminuye la productividad notablemente, pero es posible realizara con equipo de menor capacidad.

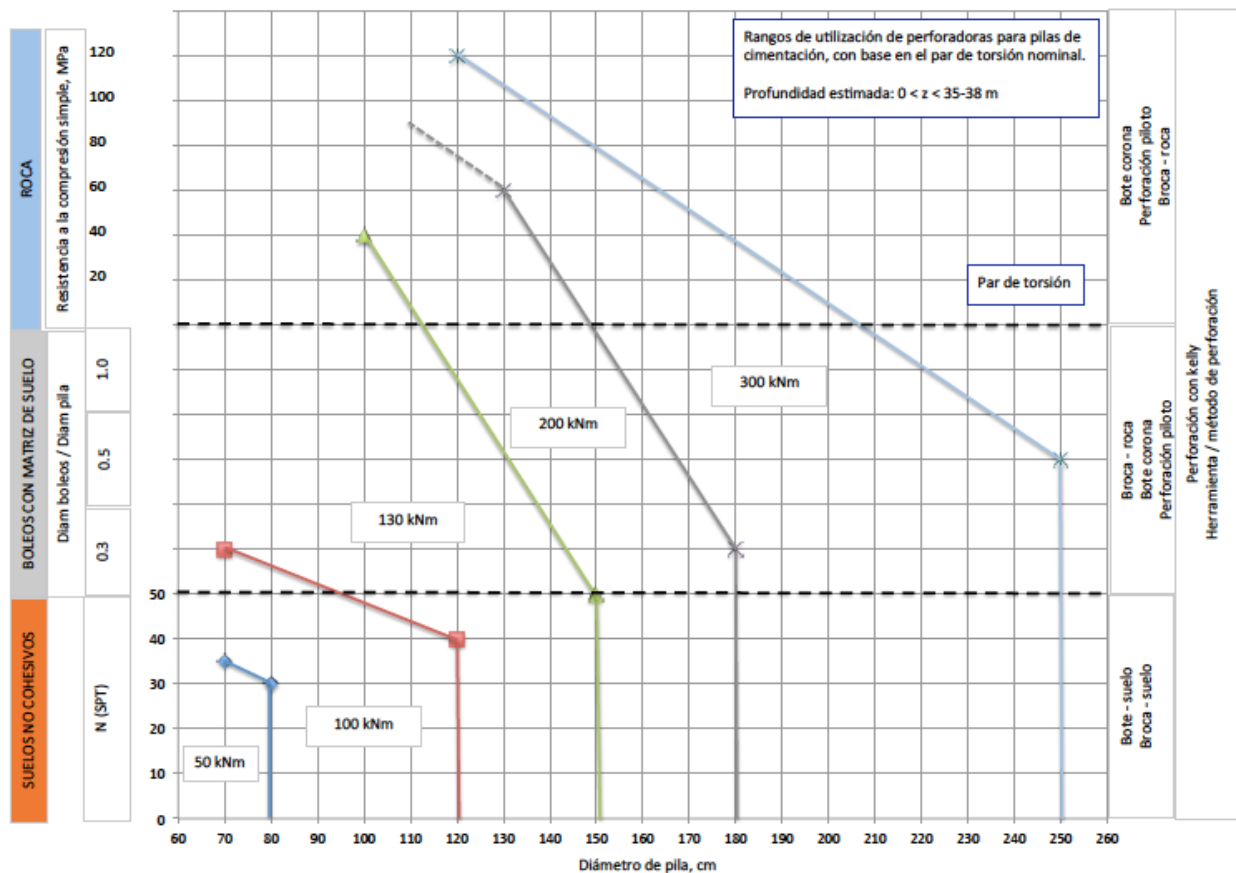


Fig. 3 Selección de equipo de perforación con base en el diámetro de la pila y las características del suelo o roca.

### 3. Ejemplos de procedimiento constructivo

**Ejemplo 1.** Se planea construir pilas de cimentación de 1.5 m de diámetro, en una antigua mina a cielo abierto, que fue rellenada sin control, Tabla 1. El nivel de agua freática no se encontró hasta la máxima profundidad explorada. La longitud de perforación es de 30 m, aproximadamente.

Tabla 1, estratigrafía del ejemplo 1

Estrato	De, m	A, m	N <sub>SPT</sub>	Descripción
A	0.0	26.0	0-15	Relleno no controlado: limo arenoso, basura, material producto de demolición, arcilla de consistencia blanda.
B	26.0	28.0	5-10	Boleos de hasta 1.5 m de diámetro, en una matriz de limo arenoso.
C	28.0	40.0	>50	Toba limosa.

- *Selección de perforadora.* De acuerdo con la Figura 3, el par de torsión se encuentra arriba de 300 kNm.
- *Estabilidad de la perforación.* Para los estratos I y II, se requerirá perforación con ayuda de ademes metálicos, que podrán colocarse de la siguiente manera:
  - Colocando los ademes en una perforación previa, cuando sea posible
  - Utilizando una osciladora para ademes, Figura 4a
  - Alternando la perforación con la colocación de relleno fluido, y reperformando
  - Utilizando ademes telescopiados, Figura 4b
- *Herramientas de perforación.* Para el estrato I, broca para suelos; para el estrato II, se requerirán brocas y botes para roca, además de trépano y/o hammer grab.



a) Ademe en perforación previa



b) Osciladora para ademes

Fig. 4 Colocación de ademes para el Ejemplo 1

**Ejemplo 2.** Se requiere construir pilas de cimentación de 120 cm de diámetro y 24 m de longitud, en un depósito con las características que se muestran en la Tabla 2. El nivel de agua freática se encontró a 2 m de profundidad.

Tabla 2 Condiciones estratigráficas del ejemplo 2

Estrato	De, m	A, m	N <sub>sPT</sub>	Descripción
A	0.0	1.8	2-6	Arena fina suelta
B	1.8	7.0	23-30	Arena fina gris oscuro de compacidad media
C	7.0	45.0	>50	Arena compacta

- *Selección de perforadora.* De acuerdo con la Figura 3, el par de torsión se encuentra alrededor de 150 kNm.

Como primer procedimiento constructivo, se eligió perforación con sistema de hélice continua (CFA), con doble cabeza rotaria, que permitió instalar un ademe metálico, de forma alternada a la perforación, hasta la profundidad de desplante, Figura 5a. La perforación se realizó en forma exitosa, conteniendo las paredes con el ademe metálico; sin embargo, al retirar la hélice continua para continuar con la colocación de acero de refuerzo y concreto, se presentó una falla de fondo, llenando el interior del ademe con suelo en estado suelto, entre 6-8 m arriba de la profundidad de desplante. Una posible solución consistía en colocar el ademe metálico por debajo del nivel de desplante; sin embargo, las limitaciones del equipo no lo permitieron. Después de intentar diversas modificaciones al sistema sin éxito, se optó por cambiar el procedimiento constructivo por perforación intermitente, utilizando perforadoras con kelly telescópico, y estabilizando la perforación con lodo bentonítico en toda la longitud, y con ademe metálico los primeros 3 m, Figura 5b. Con este procedimiento no se tuvieron contratiempos de importancia en la perforación de pilas. Incluso, se realizaron pruebas de carga (11) y de integridad (al 100% de las pilas, 900 ensayos), con lo que quedó demostrada la viabilidad del segundo procedimiento.



a) Procedimiento constructivo I: perforación con hélice continua y ademe, utilizando una cabeza rotaria doble. b) Procedimiento constructivo II: perforación con Kelly telescópico, lodo bentonítico y ademe metálico en una porción de la perforación.

Fig. 5 Procedimientos constructivos del Ejemplo 2.

**Ejemplo 3.** Se plantea la construcción de pilas de 100, 160 y 180 cm de diámetro, con longitud de 50 m. La estratigrafía se muestra en la Tabla 3. El nivel freático se encontró a 1.5 m de profundidad.

Tabla 3 Condiciones estratigráficas del ejemplo 3

Estrato	De, m	A, m	N <sub>SPT</sub>	Descripción
A	0.0	5.0	10	Relleno artificial, arcilla de consistencia media a firme
B	5.0	29.0	0-5	Arcilla de consistencia muy blanda
C	29.0	33.0	>50	Arena limosa con gravas, compacta

D	33.0	47.0	5-10	Arcilla de consistencia blanda a firme
E	47.0	60.0	>50	Gravas con empacadas en limo

- *Selección de perforadora.* De acuerdo con la Figura 3, el par de torsión se encuentra en el rango de 200 kNm.
- *Estabilidad de la perforación.* Es posible realizar la perforación con lodo bentonítico o con lodo de polímeros, con viscosidad Marsh superior a 45 segundos.
- Para evitar sobreconsumos importantes durante la colocación de concreto, así como garantizar la continuidad de las pilas, se utilizaron ademes permanentes, Figura 6.



a) ademe metálico permanente, Avelar (2011)



b) espiro ducto como ademe

Fig. 6 Procedimiento constructivo del ejemplo 3.

**Ejemplo 4.** Se construyen pilas de cimentación en una zona de tobas, intercaladas con arena pumítica, con la presencia de minas subterráneas abandonadas, Tabla 4. Las pilas son de 90, 100 y 120 cm de diámetro, con longitudes entre 23 y 31 m. No se encontró el nivel freático hasta la máxima profundidad explorada.

Tabla 4 Condiciones estratigráficas del ejemplo 4

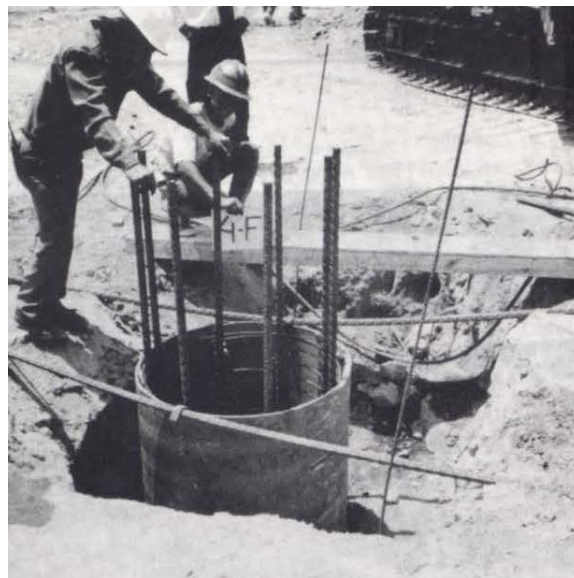
Estrato	De, m	A, m	NsPT	Descripción
A	0.0	1.0	-	Relleno formado por limos, arenas y gravas
B	1.0	3-11	20-50	Limo arenoso de consistencia media a dura, con intercalaciones de arena y arena pumítica
C	3-11	45.0	>50	Toba arena limosa con gravillas

- *Selección de perforadora.* De acuerdo con la Figura 3, el par de torsión se encuentra en el rango de 130 kNm.

La problemática de perforación la presentan las minas antiguas, que pueden consumir volúmenes importantes de concreto si no se contiene dentro del fuste de la pila.

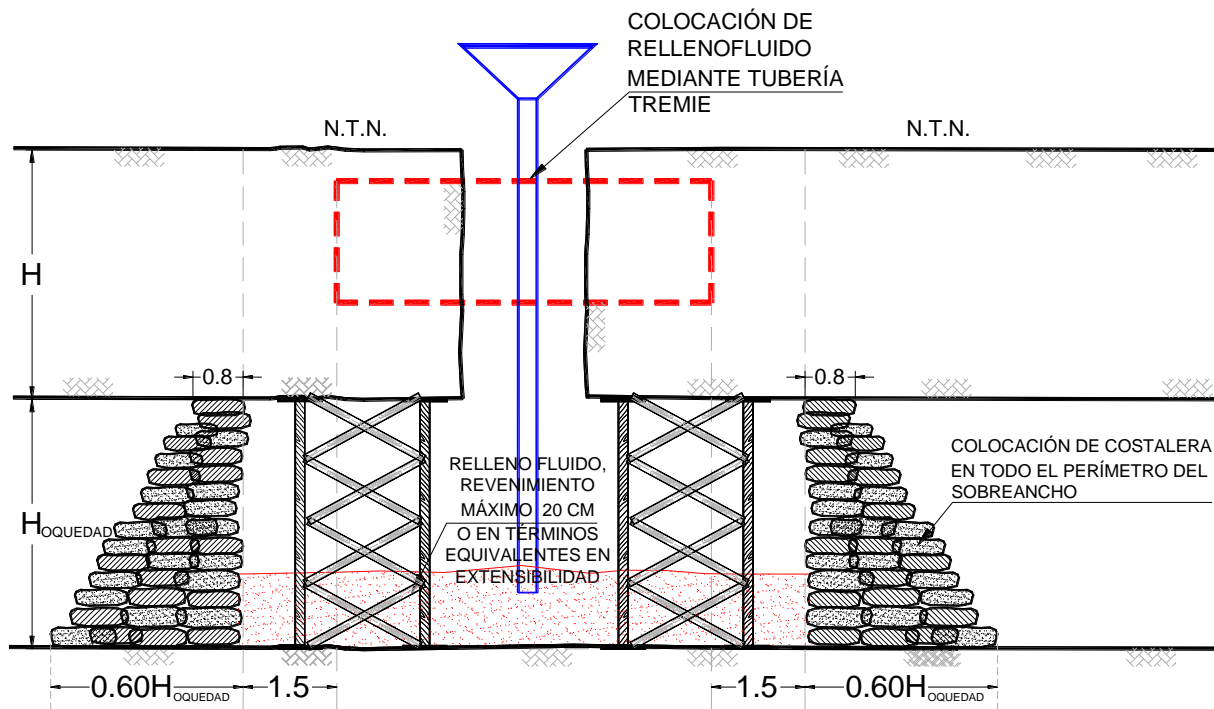
Al realizarse la perforación es en seco, es posible utilizar ademes de cartón, con un refuerzo de alambres de acero en el exterior, que se introducen antes de la colocación del acero de refuerzo, Figura 7a. Se recomienda un traslape del ademe con el suelo fuera de la cavidad, de entre 1 y 1.5 veces el diámetro de la pila.

Otra posibilidad consiste en localizar la cavidad, y confinarla con elementos colocados desde el interior, Figura 7b.



a) ademe permanente de cartón, Ponce y Moscoso (1992)





b) confinando la cavidad, Rodríguez (2015)

Fig. 7 Contención de concreto para el Ejemplo 4.

**Comentario final.** Se acepta de antemano que las soluciones a los ejemplos planteados no son únicas; dependerá del Ingeniero en Cimentaciones Profundas aplicar su creatividad e ingenio para resolver los problemas que se le presenten, de acuerdo con los recursos con los que cuente, así como la información geotécnica disponible.

## Referencias

Avelar, R. (2011), "Fabricación de pilas en suelos blandos, con altos contenidos de agua", Simposio Internacional de Cimentaciones Profundas, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, México.

Bottiau, M. (2006), "Recent evolutions in deep foundation technology", Proceedings DFI/EFFC 10th International Conference on Piling and Deep Foundations, Amsterdam, The Netherlands.

Paniagua, W.I (2016), "Procedimientos constructivos", capítulo 5 en *Ingeniería de Cimentaciones Profundas*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, México.

Ponce J.A. y Moscoso R. (1992), "Construcción de pilas en presencia de cavernas", Simposio *Experiencias Geotécnicas en el Poniente de la Ciudad de México*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.

Rodríguez, A. (2015), "Procedimientos constructivos especiales en la cimentación de las Autopistas Urbana Norte y Sur de la Ciudad de México", Tesina para optar por el grado de Especialista en Geotecnia, UNAM, México.