



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

9

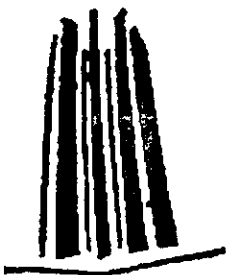
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS ARAGON.

CONCEPTOS BASICOS EN PILOTES

297115.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
REYES DOMINGUEZ CANALES

ASESOR : ING. GABRIEL ALVAREZ BAUTISTA





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN
DIRECCIÓN**

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**REYES DOMÍNGUEZ CANALES
P R E S E N T E.**

En contestación a la solicitud de fecha 16 de febrero del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. GABRIEL ÁLVAREZ BAUTISTA pueda dirigirle el trabajo de tesis denominado "CONCEPTOS BÁSICOS EN PILOTES", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
San Juan de Aragón, México, 6 de marzo del 2001
EL DIRECTOR

M en R.I. CARLOS EDUARDO LEVY VÁZQUEZ



C p Secretaría Académica.
C p Jefatura de la Carrera de Ingeniería Civil.
C p Asesor de Tesis.

CELV/AIR/vr

CONCEPTOS BÁSICOS EN PILOTES.

INTRODUCCIÓN.

CAPITULO I CLASIFICACIÓN.

1.1	Por la forma en que transmiten la carga al subsuelo.	1
1.1.1.	Pilotes con carga vertical.	1
1.1.1.1.	Pilotes de punta.	1
1.1.1.1.a.	Pilotes de punta con empotramiento.	3
1.1.1.2.	Pilotes de fricción.	3
1.1.1.2.a.	Pilotes de anclaje.	3
1.1.2.	Pilotes con carga vertical y horizontal.	4
1.1.2.1.	Pilotes inclinados.	4
1.2	Material de fabricación	4
1.2.1	Pilotes fabricados de concreto.	5
1.2.1.1	Pilotes prefabricados de concreto.	5
1.2.1.2	Pilotes de concreto colados in situ.	6
1.2.2	Pilotes fabricados de Acero.	6
1.2.3	Pilotes mixtos (aceros y concreto).	6
1.2.4	Pilotes fabricados de madera.	7
1.3	Por su procedimiento constructivo.	7
1.3.1	Con desplazamiento.	7
1.3.1.1	Pilotes hincados a percusión	7
1.3.1.2	Pilotes hincados a presión.	8
1.3.1.3	Pilotes hincados con vibración.	9
1.3.2	Con poco desplazamiento.	9
1.3.2.1	Pilotes hincados en perforación previa.	9
1.3.2.2	Pilotes hincados con chiflón.	9
1.3.2.3	Pilotes de área transversal pequeña.	10
1.3.3	Pilotes sin desplazamiento.	10
1.3.3.1	Pilotes colados in situ.	10
1.4	Pilotes especiales.	10
1.4.1	Pilotes de Control.	10
1.4.2	Pilotes entrelazados.	13

CONCEPTOS BÁSICOS EN PILOTES.

1.5	Ventajas y desventajas de los tipos de pilotes.	13
1.5.1	Pilotes con desplazamiento.	13
1.5.1.1	Pilotes hincados y colados en el sitio.	13
1.5.1.2	Pilotes de concreto reforzado, preesforzado, prefabricados e hincados.	14
1.5.1.3	Pilotes de madera. Ventajas y desventajas.	15
1.5.2	Pilotes con poco desplazamiento. Secciones H y tubos.	15
1.5.3	Pilotes sin desplazamiento.	16
1.5.4	Pilotes especiales.	16
1.5.4.1	Pilotes de control.	16
1.5.4.2	Pilotes entrelazados.	16

CAPITULO II. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

2.1	Acero de refuerzo	19
2.2	Concreto.	19
2.2.1	Agua.	22
2.2.2	Agregados pétreos para el concreto.	24
2.2.2.1	Agregado fino.	24
2.2.2.2	Agregado grueso.	24
2.2.3	Cemento portland.	25
2.2.4	Cemento portland puzolánico.	26
2.2.5	Aditivos.	26
2.2.5.1	Aditivos químicos.	26
2.2.5.2	Inclisor de aire.	31
2.2.5.3	Membrana de curado.	31
2.2.5.4	Aditivos minerales.	31
2.3	Lodos de perforación.	32
2.3.1	Dosificación	33

CAPITULO III. MAQUINARIA Y EQUIPO.

3.1	Equipo para hincado de Pilotes.	35
3.1.1	Equipo para hincado a percusión.	35
3.1.2	Herramientas para pilotes	37
a)	Resbaladeras.	37
b)	Gorros de protección	38

CONCEPTOS BÁSICOS EN PILOTES.

3.2	Hincado de pilotes con vibración	39
3.2.1	Vibrohincadores	39
3.3	Selección del equipo de hinca	41
3.4	Equipo para el manejo de pilotes	42
3.4.1	Grúas	42
3.5	Equipo para realizar perforaciones previas	44
3.5.1	Perforadoras	44
3.5.2	Excavadoras de almeja	46
3.5.3	Herramientas de perforación	46
	a) Brocas espirales	47
	b) Botes cortadores	47
	c) Trépanos	48
3.5.4	Pilotes hincados con chiflón	48

CAPÍTULO IV. DISEÑO GEOTÉCNICO.

4.1	Proceso del diseño geotécnico	52
4.1.1	Datos, cargas, entorno y geometría	53
4.1.2	Investigación del subsuelo	53
4.1.3	Diseño tentativo	53
4.1.4	Análisis estático y dinámico	54
4.1.5	Verificación de la seguridad	54
4.2	Análisis por cargas verticales	54
4.2.1	Análisis estático por carga última	55
	4.2.1.1 Método estático	55
	4.2.1.2 Resistencia última unitaria por punta	56
	4.2.1.3 Teoría de Zeevaert	58
	4.2.1.4 Resistencia última por fricción	59
4.3	Pilotes en suelos friccionantes	59
4.3.1	Resistencia por punta	59
4.3.2	Resistencia por fricción de pilotes en suelos granulares	65
4.3.3	Capacidad de carga según la penetración estándar	66
4.3.4	Capacidad de carga según la penetración estática con cono	67
4.3.5	Asentamiento en suelos friccionantes	67
4.3.6	Asentamiento de pilotes colados in situ	69

CONCEPTOS BÁSICOS EN PILOTES.

4.4	Pilotes En Suelos Cohesivos.	70
4.4.1	Capacidad de carga por fricción en arcillas.	70
4.4.1.1	Capacidad de carga en arcillas con $C_u < 10 \text{ ton/cm}^2$	70
4.4.1.2	Capacidad de carga en arcillas con $C_u > 10 \text{ ton/m}^2$.	73
4.4.2	Resistencia de pilotes por punta en suelos cohesivos.	73
4.4.3	Pilotes colados en sitio en suelos cohesivos.	74
4.5	Cálculo de asentamientos de cimentaciones sobre pilotes de fricción.	75
4.6	Pilotes en roca.	77
4.6.1	Asentamientos en roca.	77
4.6.2	Capacidad de carga.	78
4.6.2.1	Capacidad de carga por punta en roca.	79
4.6.2.2	Capacidad de carga por adherencia entre roca y concreto.	79
4.7	Grupos de Pilotes.	82
4.7.1	Espaciamiento.	82
4.7.2	Capacidad de carga de grupos de pilotes.	83
4.7.3	Asentamiento de grupos de pilotes en suelos granulares	84
4.7.4	Asentamiento de grupos de pilotes en suelos cohesivos.	85
4.8	Fricción negativa.	86

CAPÍTULO V. CONSTRUCCIÓN Y ESPECIFICACIONES.

5.1	Pilotes Hincados.	90
5.1.1	pilotes de concreto prefabricados.	90
5.1.1.1	Fabricación.	90
a)	Camas de colado	90
b)	Moldes	90
c)	Acero de refuerzo	90
d)	Concreto	91
e)	Colado y curado	92
f)	Decimbrado	92
5.1.1.2	Manejo de los pilotes.	92
5.1.1.3	Juntas .	92
5.1.1.4	Pilotes de concreto presforzados.	94
5.1.1.5	Pilotes de acero.	96
5.1.1.6	Hincado de pilotes con desplazamiento.	96
5.1.1.7	Hincado de pilotes en perforación previa.	98
5.1.1.8	Prevención de daños en el pilote.	99

CONCEPTOS BÁSICOS EN PILOTES.

5.2	Pilotes colados en sitio.	99
5.2.1	Excavación.	100
5.2.2	Armado y habilitado.	100
5.2.3	Colado del concreto.	101
5.2.3.1	Colado en seco.	101
5.2.3.2	Colado bajo agua o lodo.	101

CAPÍTULO VI . PRUEBAS DE CARGA EN PILOTES.

6.1	Formas de aplicación de la carga.	105
6.1.1	Con Lastre.	105
6.1.1.1	Plataforma lastrada.	105
6.1.1.2	Viga en cantiliver.	106
6.1.2	Con sistema hidráulico de presión.	107
6.1.2.1	Pilotes de anclaje.	107
6.1.3	Viguetas de anclaje.	108
6.1.4	Dispositivos de medición.	108
6.2	Tipos de pruebas de carga	110
6.2.1	Pruebas de carga estática	110
6.2.1.1	Criterio de Carga controlada	110
6.2.1.2	Criterio de desplazamiento controlado	112
6.2.1.3	Criterio de Asentamientos controlado	112
6.2.1.4	Rapidez de penetración constante	112
6.3	Pruebas dinámicas.	112
6.4	Presentación de resultados.	113
6.4.1	Penetración contra número de golpes.	114
6.4.2	Recuperación elástica	114
6.4.3	Gráfica de carga contra asentamiento	114
6.4.4	Carga y asentamiento contra tiempo	115
6.4.5	Carga contra asentamiento de fluencia	115
6.4.6	Respuesta del pilote a la carga.	116
6.4.7	Determinación de la capacidad de carga.	116
6.5	Variación de la capacidad de carga con el tiempo.	117
6.6	Ensayo de carga "Statnamic".	118
6.6.1	Instrumentación.	119

CONCEPTOS BÁSICOS EN PILOTES.

CONCLUSIONES.

ANEXO FOTOGRAFICO.

BIBLIOGRAFIA.

AGRADECIMIENTOS

A la memoria de mi Madre.

María Juana Canales Islas.

Gracias por haberme enseñado a amar la vida, a amar el trabajo y a respetar a la gente. Gracias por habernos amado por sobre todas las cosas.

A Mis hermanos Y hermanas.

Porque con ellos he aprendido a vivir, porque hemos llorado, disfrutado y compartido. Por la suerte de haber nacido en esta hermosa familia.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

Por brindarme la oportunidad de ser.

A todos mis maestros.

Porque de ellos obtenemos valiosos conocimientos, valores y lecciones de vida, porque su gran labor siempre será recompensada por nuestro agradecimiento.

A mis compañeros y amigos de la carrera.

Porque juntos vivimos grandes tiempos y por los mejores tiempos que el porvenir ha de traernos.

Al Ing. Gabriel Álvarez Bautista.

Modelo a seguir e inspiración de generaciones.

A mi México.

A la vida.

GRACIAS.

Reyes Domínguez Canales.

INTRODUCCIÓN.

En algunos casos las condiciones del subsuelo no presentan las características necesarias para la utilización de una cimentación de tipo superficial, para determinado proyecto donde las cargas son de gran magnitud, en tal caso se hace necesario buscar estratos de apoyo con una mayor capacidad de carga, sin embargo estos estratos no siempre aparecen a niveles económicamente factibles de alcanzar, en tales condiciones es necesario utilizar los suelos blandos y poco resistentes con que se cuenta y distribuir la carga a través de ellos, en estos casos y en otros se hace necesaria la utilización de cimentaciones profundas. Dentro de los diversos tipos de cimentaciones profundas se encuentran los pilotes, las pilas y los cilindros.

El presente trabajo se enfocará solo al análisis de pilotes, el tratamiento del tema será en forma general, aunque el campo de estudio sobre pilotes es muy extenso, ya que existe mucha información que actualmente no es aplicable o que no lo es en México, pero que ha sido usada a nivel mundial.

Esta tesis está dirigida a todos aquellos estudiantes de Ingeniería Civil interesados en complementar los cursos de cimentaciones impartidos y que estén particularmente interesados en el tema de pilotes, debido a la bastedad del tema se recomienda analizar el presente trabajo como una base para estudios más detallados.

El objetivo del presente trabajo es el análisis de las componentes principales del tema de pilotes, entre estas se consideraron las siguientes, como las de mayor importancia: clasificación de pilotes, materiales de construcción, maquinaria y equipo, diseño geotécnico, construcción y especificaciones y por último pruebas de carga. El tratamiento de los temas anteriores se realizará a lo largo de los seis capítulos que integran la presente tesis, tratándolos de manera completa pero evitando extenderse demasiado en ellos, siempre que sea posible, debido a que cada uno de ellos tienen particularidades que pueden ser tema de otras tesis.

El uso de pilotes se hace necesario cuando se requiere:

1. Transmitir las cargas de una estructura a través de un estrato de suelo blando o de agua hasta un estrato de suelo más resistente, que garantice un apoyo adecuado.
2. Transmitir la carga a un cierto espesor de suelo blando utilizando para ello la fricción lateral que se produce entre suelo y pilote.
3. Compactación de suelos granulares para aumentar su capacidad de carga.
4. Proporcionar anclaje lateral a ciertas estructuras o resistir fuerzas laterales que se aplican sobre ellas.
5. Proporcionar anclaje a estructuras sujetas a subpresión o momentos de volcadura.
6. Alcanzar profundidades que permitan eliminar los efectos nocivos causados por erosión o socavación del estrato de apoyo.
7. Absorber la energía del impacto de barcos u objetos flotantes en estructuras como muelles o atracaderos.

Debido a lo anterior los pilotes se pueden clasificar de formas variadas, en el Capítulo I se mencionarán las diversas formas en que se han clasificado los pilotes. En este capítulo se expone en forma somera dos tipos especiales de pilotes, los pilotes de control y los pilotes entrelazados, que se utilizan en condiciones específicas del suelo de sustentación. Cada tipo de pilote implica ventajas y desventajas que tienen que ver con el material usado en su fabricación y el proceso constructivo seguido, debido a esto se incluye un apartado con las ventajas y desventajas de cada tipo de pilote.

En el Capítulo II se presenta una serie de normas y características que deben cumplir los materiales utilizados en la fabricación de los pilotes, esto se debe a que es muy importante la verificación en todos los procesos que integran la fabricación de los pilotes y dicha verificación debe de estar presente desde la selección de los materiales. Se mencionan las normas de la ASTM y las Normas Oficiales Mexicanas que son aplicables en cada caso.

Aunque los lodos de perforación no son precisamente materiales de fabricación se incluye en este capítulo un apartado que trata algunas características de ellos, esto es debido a la importancia que éstos tienen en el proceso constructivo de algunos tipos de pilotes. Por facilidad se consideró la presentación de la mayor parte de la información de este capítulo en cuadros que resumen las características de los materiales.

Como se verá en el desarrollo del presente trabajo la selección de un adecuado proceso constructivo, en función de las características del subsuelo y de variables que tienen que ver con experiencia en la construcción del tipo de pilote, entre otras, es de gran importancia, pero de nada sirve que el proceso halla sido correctamente seleccionado si no es ejecutado con calidad y precisión.

La correcta ejecución del proceso constructivo de pilotes depende en gran medida de la adecuada selección de la maquinaria y el equipo que se va utilizar, es por ello que en el capítulo III se presenta en forma generalizada el equipo que se utiliza con mayor frecuencia en el procedimiento constructivo de pilotes, ya sean colados en el sitio o hincados. Se menciona además algunos de los modelos de grúas y martillos piloteadores que son de uso común en México, y se enumeran algunas características de los mismos.

La maquinaria debe ser seleccionada en función del tamaño de la obra, pero en ocasiones interfieren otras variables como disponibilidad de equipo y limitaciones en el tamaño de los accesos a las obras, lo anterior debe tenerse en cuenta al seleccionar el equipo, por esta razón se menciona un criterio para la selección del martillo piloteador.

Se incluye, además, en el Capítulo III un apartado referente a los aditamentos que se hacen necesarios en el manejo de los pilotes, así como de accesorios que deben colocarse en los martillos piloteadores.

En el diseño de pilotes son dos los factores determinantes la capacidad de carga y el asentamiento que se produce, son variados los criterios que existen para la determinación del valor de los conceptos anteriores, debido a lo anterior en el Capítulo IV son tratados algunos de los criterios existentes para la determinación de los conceptos antes mencionados. Solo se incluyeron las expresiones más usuales para la obtención de la capacidad carga y el cálculo del asentamiento.

Para una mayor facilidad en su consulta el capítulo IV está dividido según el tipo de suelo, de tal forma que se podrá encontrar las expresiones aplicables a suelos friccionantes, cohesivos y a rocas, según el usuario requiera.

Debido a su importancia en la práctica se incluye un método simplificado para el cálculo del asentamiento en pilotes de fricción, este método es muy conveniente ya que no se necesita de utilizar computadora y no se requieren cálculos muy complicados, además los resultados que se

obtienen de su aplicación no son muy diferentes a los obtenidos con métodos en los que se utiliza la computadora.

El comportamiento que tiene un pilote individual puede diferir del que se presenta cuando estos trabajan en grupo, se incluye un apartado del capítulo IV conceptos generales en torno al comportamiento de grupos de pilotes. Otro aspecto importante de este capítulo es la exposición de los efectos de la llamada fricción negativa, que se presenta en suelos cohesivos con altos contenidos de agua.

La presentación de las recomendaciones de construcción de pilotes, ya sean hincados o colados en el sitio es el objeto del capítulo V de la presente tesis. En esta parte se exponen las principales normas en cuanto a almacenaje, manejo de materiales, manejo de pilotes y en forma muy especial recomendaciones aplicables al hincado del pilote y a las etapas previa y posterior a la misma. Es importante evitar que se dañe el pilote en cualquiera de las etapas del procedimiento constructivo, por lo anterior se decidió incluir este capítulo recomendaciones para evitar que el pilote se dañe durante el hincado.

Los métodos para el diseño geotécnico de los pilotes tienen siempre un grado de incertidumbre inherente a su carácter empírico o semiempírico. De igual manera al determinar las características del subsuelo pueden existir dudas de los valores, estas incertidumbres conducen a la aplicación de factores de seguridad que resultan antieconómicos. Es determinante, para conocer la capacidad de carga de pilotes la realización de pruebas de carga, que se realizan en pilotes de prueba o directamente en los pilotes que han de trabajar en la estructura. En esta parte de la tesis se exponen los diferentes tipos de pruebas de carga y las formas de aplicación de la carga a la cabeza del pilote.

Este capítulo incluye un apartado en el que se describe la forma en que debe disponerse el equipo para que la realización de la prueba sea segura y conduzca a resultados reales. Se describe brevemente los equipos utilizados en la medición de los resultados. En este capítulo se mencionan, de igual forma, los datos que deben obtenerse de este tipo de pruebas, que tipo de información se debe graficar y la forma en que debe presentarse, para tener una adecuada interpretación de la información obtenida de la prueba de carga.

Se consideró necesario incluir un anexo fotográfico de una obra en la que se realiza el hincado de pilotes de concreto con perforación previa, esto es con el objeto de mostrar como opera la maquinaria, y como debe ubicarse esta dentro de la obra y además fortalecer lo expuesto en los capítulos previos.

CAPITULO I.

CLASIFICACIÓN.

CAPÍTULO I CLASIFICACIÓN.

Una vez realizado el análisis de la selección del sistema de cimentación requerido se ha decidido que es necesaria la utilización de pilotes el ingeniero se ve precisado a determinar el tipo pilote de entre una amplia gama de éstos y tamaños existentes. Es por ello que se hace necesario contar con el conocimiento de una adecuada clasificación de pilotes.

Los pilotes se pueden clasificar en base a tres factores, que intervienen directamente en el diseño y la construcción y que son:

- a) Forma en que es transmitida la carga al subsuelo.
- b) Material de fabricación.
- c) Procedimiento constructivo.

En el *cuadro 1.1* se muestra la clasificación general de pilotes.

A continuación se describen las características de cada tipo de pilote de la clasificación anterior

1.1 POR LA FORMA COMO TRANSMITEN LA CARGA AL SUBSUELO.

Los pilotes se utilizan para transmitir las cargas de la estructura a través de un suelo de baja capacidad de carga, a capas de suelo más profundas con alta capacidad de carga (por punta), o a profundidades tales, en suelos de baja capacidad de carga, que permitan desarrollar suficiente resistencia por fricción en la superficie de contacto con el suelo (fricción); los pilotes también se utilizan para anclar estructuras en suelos expansivos y para resistir cargas horizontales inducidas por la estructura o por sismo, en este caso se construyen inclinados.

1.1.1 PILOTES CON CARGA VERTICAL.

1.1.1.1 Pilotes de Punta.

Cuando el o los estratos de suelo superficiales son de espesor considerable, compresibles y de baja resistencia al esfuerzo cortante, utilizando pilotes de punta se transmite prácticamente todo el peso y las cargas de la superestructura (Q) a un estrato profundo de suelo más resistente o a un estrato de roca (*ver figura 1.1*).

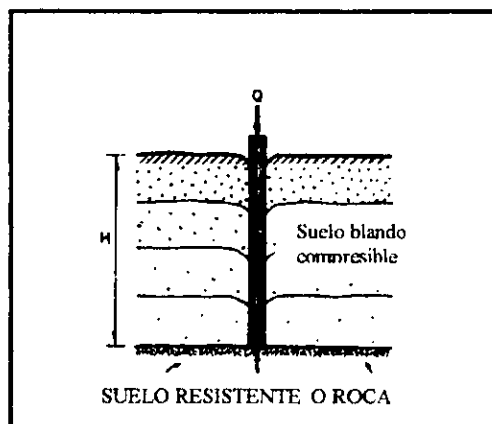


FIGURA 1.1 Pilotes de Punta.

PILOTES																	
a) Forma de transmitir carga a al subsuelo	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;">Carga Vertical</td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Punta</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Fricción</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Anclaje por fricción</td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: top;">Carga vertical y Horizontal</td> <td style="vertical-align: top;">Pilotes inclinados</td> </tr> </table>	Carga Vertical	<table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Punta</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Fricción</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Anclaje por fricción</td> </tr> </table>	Punta	Fricción	Anclaje por fricción		Carga vertical y Horizontal	Pilotes inclinados								
Carga Vertical	<table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Punta</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Fricción</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Anclaje por fricción</td> </tr> </table>	Punta	Fricción	Anclaje por fricción													
Punta	Fricción																
Anclaje por fricción																	
Carga vertical y Horizontal	Pilotes inclinados																
b) Materiales	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Concreto</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Prefabricado</td> </tr> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Acero</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Colado in situ</td> </tr> </table> </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Concreto y Acero</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Madera</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>	<table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Concreto</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Prefabricado</td> </tr> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Acero</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Colado in situ</td> </tr> </table>	Concreto	Prefabricado	Acero	Colado in situ	<table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Concreto y Acero</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Madera</td> </tr> </table>	Concreto y Acero	Madera								
<table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Concreto</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Prefabricado</td> </tr> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Acero</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Colado in situ</td> </tr> </table>	Concreto	Prefabricado	Acero	Colado in situ	<table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Concreto y Acero</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Madera</td> </tr> </table>	Concreto y Acero	Madera										
Concreto	Prefabricado																
Acero	Colado in situ																
Concreto y Acero	Madera																
c) Proceso constructivo	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Con desplazamiento</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;"> <table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados a percusión</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados a presión</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados con vibración</td> </tr> </table> </td> </tr> </table> </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Con poco desplazamiento</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;"> <table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados en una perforación previa</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincado con chislon</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Área transversal pequeña</td> </tr> </table> </td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: top;">Sin desplazamiento</td> <td style="vertical-align: top;">Concreto colado in situ</td> </tr> </table>	<table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Con desplazamiento</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;"> <table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados a percusión</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados a presión</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados con vibración</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>	Con desplazamiento	<table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados a percusión</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados a presión</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados con vibración</td> </tr> </table>	Hincados a percusión	Hincados a presión	Hincados con vibración		<table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Con poco desplazamiento</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;"> <table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados en una perforación previa</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincado con chislon</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Área transversal pequeña</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>	Con poco desplazamiento	<table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados en una perforación previa</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincado con chislon</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Área transversal pequeña</td> </tr> </table>	Hincados en una perforación previa	Hincado con chislon	Área transversal pequeña		Sin desplazamiento	Concreto colado in situ
<table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Con desplazamiento</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;"> <table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados a percusión</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados a presión</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados con vibración</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>	Con desplazamiento	<table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados a percusión</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados a presión</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados con vibración</td> </tr> </table>	Hincados a percusión	Hincados a presión	Hincados con vibración		<table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Con poco desplazamiento</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;"> <table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados en una perforación previa</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincado con chislon</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Área transversal pequeña</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>	Con poco desplazamiento	<table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados en una perforación previa</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincado con chislon</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Área transversal pequeña</td> </tr> </table>	Hincados en una perforación previa	Hincado con chislon	Área transversal pequeña					
Con desplazamiento	<table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados a percusión</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados a presión</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados con vibración</td> </tr> </table>	Hincados a percusión	Hincados a presión	Hincados con vibración													
Hincados a percusión	Hincados a presión																
Hincados con vibración																	
Con poco desplazamiento	<table border="0"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincados en una perforación previa</td> <td style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Hincado con chislon</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black;">Área transversal pequeña</td> </tr> </table>	Hincados en una perforación previa	Hincado con chislon	Área transversal pequeña													
Hincados en una perforación previa	Hincado con chislon																
Área transversal pequeña																	
Sin desplazamiento	Concreto colado in situ																

Cuadro 1.1 Clasificación General de Pilotes.

1.1.1.1.a) Pilotes de Punta con Empotramiento.

Para aumentar la capacidad de carga de pilotes se puede empotrar una cierta profundidad D en el estrato resistente. Se recomienda hacerlo a una profundidad de 4 a 6 veces su dimensión horizontal, dependiendo de la compacidad relativa del material de empotramiento y de la capacidad del equipo de hincado. (ver figura 1.2)

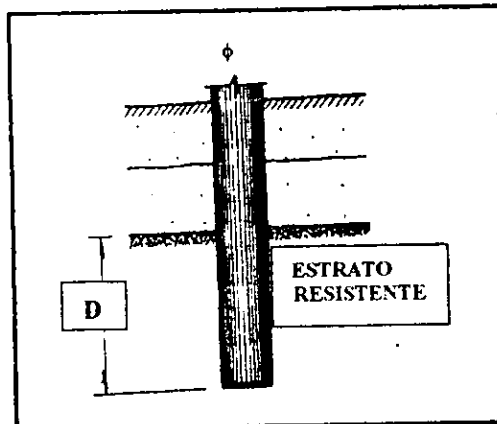


FIGURA 1.2 Empotramiento en Pilotes.

1.1.1.2 Pilotes de fricción.

Estos pilotes transmiten la carga Q al suelo que los rodea; la magnitud de la fricción lateral es función del área perimetral del pilote. Este tipo de pilotes se utilizan cuando no se encuentra un estrato resistente (a una profundidad económicamente aceptable) en el que pudieran apoyarse por punta, o cuando el sitio donde se instalarán se localiza en una zona que sufre grandes asentamientos por consolidación regional (ver figura 1.3).

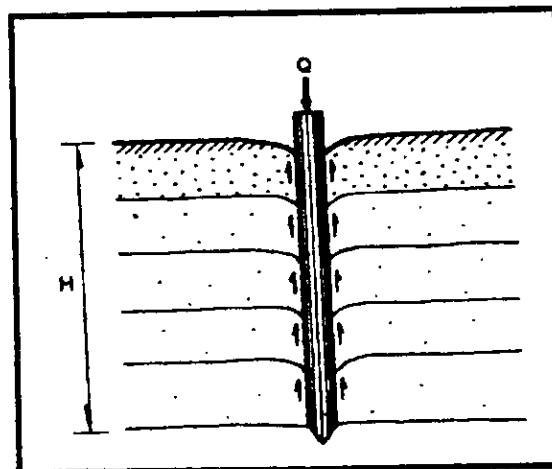


FIGURA 1.3 Pilotes de fricción.

1.1.1.2.a Pilotes de Anclaje.

Se utilizan en zonas con suelos arcillosos expansivos que por su espesor no pueden ser removidos; con estos elementos se pueden absorber movimientos estacionales que ocurren en la parte superficial de estos suelos, que se traducen en expansiones. Estos pilotes se hincan hasta alcanzar una zona de suelo estable. (ver figura 1.4)

A continuación se mencionan los materiales que se utilizan principalmente en la construcción de pilotes y que dan lugar a la clasificación que se describe en orden de importancia en cuanto a su utilización:

- 1.- Concreto
- 2.- Acero
- 3.- Mixtos (concreto y acero)
- 4.- Madera.

1.2.1 PILOTES FABRICADOS DE CONCRETO.

Los pilotes fabricados de concreto, son muy utilizados debido a que presentan características muy ventajosas, como son la disponibilidad de materiales, así como la posibilidad de poder llevar un control de calidad del material antes de hincarlo. Los pilotes de concreto pueden ser prefabricados o colados en el lugar.

1.2.1.1 Pilotes prefabricados de concreto.

Se fabrican con concreto simple, reforzado, presforzado o postensado, empleando cemento pórtland normal o resistente a los álcalis y silicatos del medio donde se hincarán. Se fabrican de una sola pieza o en segmentos, que pueden unirse con juntas rápidas o con placas de acero soldadas en ambos extremos del pilote, en el capítulo 5 se mencionan las características de las juntas.

Los pilotes prefabricados de concreto son de uso frecuente por su durabilidad y la facilidad con que se ligan a la superestructura. Sus limitaciones son relacionadas con las dificultades de fabricación manejo e hincado. Según la forma de su sección transversal pueden ser : cuadrados, octagonales, ochavados, hexagonales, triangulares, de sección H y circulares. En la figura 1.6 se muestran ejemplos de pilotes prefabricados.

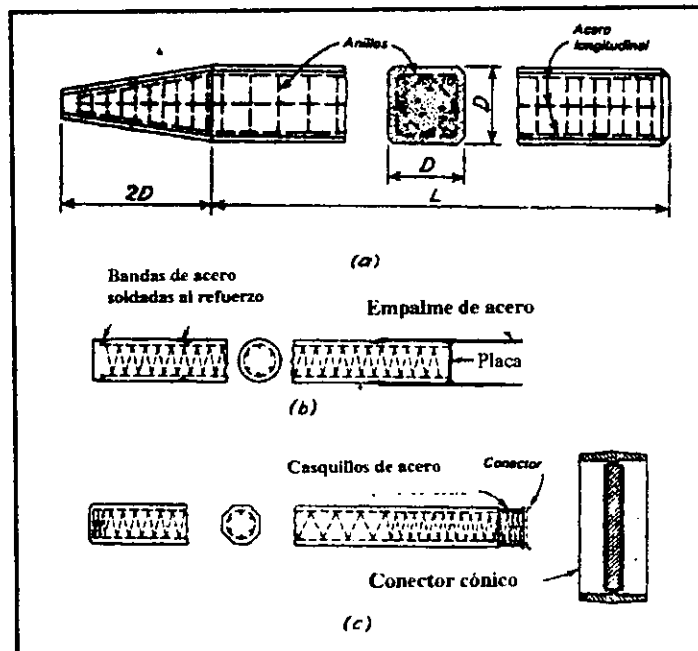


FIGURA 1.6 Pilotes Prefabricados de concreto.

- a) Tipo usado en puentes.
- b) Pilote seccional.
- c) Pilote seccional preesforzado.

1.2.1.2 Pilotes de Concreto colados in situ.

Generalmente se fabrican de concreto reforzado. El colado debe hacerse con una tubería tremie o con trompa de elefante para evitar la segregación y contaminación del concreto. El pilote colado in situ no es muy empleado, debido a que presenta desventajas tales como la posible alteración de las características del suelo y de estructuras o servicios vecinos, debido a la alteración de las características iniciales del suelo al realizar la excavación que alojará al pilote y a dificultades inherentes en la verificación de la calidad final de la pila.

1.2.2 PILOTES DE ACERO.

Estos pilotes son de secciones estructurales ligeras o pesadas dependiendo de las cargas que transmitirán. Se puede utilizar tubos de acero que pueden quedar huecos o rellenarse con concreto, secciones H; se fabrican además tubos de acero con una hélice soldada para ser introducidos a rotación.

Entre las ventajas que presentan estos pilotes están: la facilidad y precisión con que se pueden alargar o recortar y el hecho que pueden atravesar estratos duros con boleos y roca alterada, y la facilidad de su manejo. Su desventaja principal es que son susceptibles a la corrosión, cuando están expuestos en ambientes marinos, esto debe tomarse en cuenta para protegerlos debidamente, ya que es en los sitios donde más se utilizan. Los pilotes de perfiles de acero en H penetran en el terreno con facilidad, por lo que se usan frecuentemente para alcanzar estratos de gran capacidad de carga a una profundidad considerable, si el suelo presenta obstrucciones o gravas gruesas es posible que se dañen los patines y los pilotes se doblen, por esto es necesario reforzar la punta como se muestra en la *figura 1.7 a*.

Los pilotes de tubo tienen diámetros que varían de 25 a 75 cm y el espesor de la paredes va de 2.5 a 4.5 mm, si estos pilotes son hincados con el extremo abierto deben limpiarse, por lo que es necesario cerrarlos en el extremo inferior, usualmente con una placa, como se muestra en la *figura 1.7 b*, este tipo de pilotes no debe hincarse en estratos de un gran espesor, ya que el suelo cercano a la punta puede ser arrastrado y alterar las características del suelo.

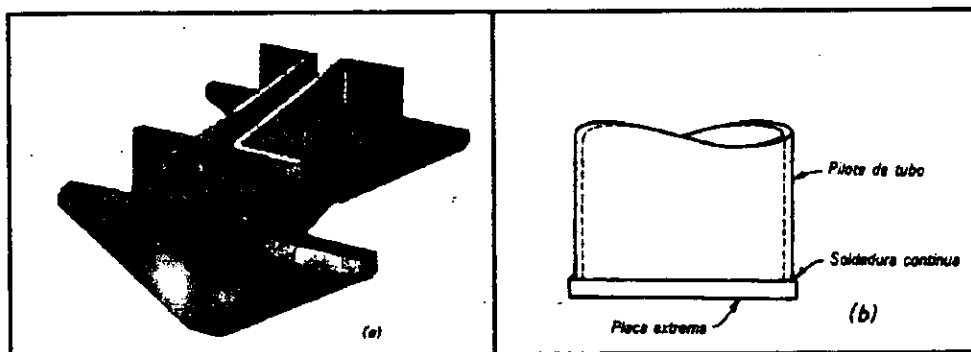


FIGURA 1.7 a) Refuerzo para punta de pilote H.
b) Placa para cerrar pilote de tubo.

1.2.3 PILOTES MIXTOS (ACERO Y CONCRETO).

Se utilizan pilotes de concreto con puntas de acero como protección durante el hincado en suelos con condiciones estratigráficas especiales (boleos, gravas gruesas u otro tipo de obstrucciones) o también con concreto arriba del nivel de las aguas freáticas y acero debajo de éstas. El costo y la dificultad para una obtener una junta aceptable han sido causa para el abandono del uso de este tipo de pilotes.

1.2.4 PILOTES FABRICADOS DE MADERA.

Los pilotes de madera han caído en desuso ante el desarrollo de los de concreto; su empleo ha quedado restringido a su utilización en la cimentación de estructuras provisionales y de embarcaderos pequeños, donde se aprovecha la resistencia de la madera para soportar las fuerzas de impacto. La limitación principal que tienen este tipo de pilotes es la facilidad con que se descompone el tramo que queda sujeto a las variaciones del nivel de agua, sobre todo estando en un ambiente salino. Se puede recubrir la parte expuesta con concreto, para retardar la descomposición de la madera. También se aplican tratamientos previos al hincado, para retardar la acción de gusanos que degradan la madera.

1.3 POR SU PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.

Se han desarrollado diversos procedimientos constructivos para fabricar y posteriormente colocar o para fabricar en el sitio mismo pilotes; la característica que distingue estos procesos es que durante su construcción se produzca o no desplazamiento del suelo que los rodea. De tal forma que pueden ser: pilotes con desplazamiento (cuando el volumen de suelo desalojado es igual al del pilote), con poco desplazamiento (cuando son hincados en una perforación previa de área menor que la del pilote, pilotes de área transversal reducida, como los perfiles de acero, o pilotes hincados con ayuda de un chiflón) y sin desplazamiento, cuando son colados en el sitio.

En suelos blandos los pilotes con desplazamiento pueden inducir disminución de la resistencia al corte por el remoldeo provocado, en tanto que en suelo granulares pueden provocar aumentos en la compacidad relativa.

Los procedimientos constructivos son del dominio público o protegidos con patentes comerciales; en cuanto al equipo especializado que se utiliza, sus características y capacidades se eligen de acuerdo al tamaño del pilote por construir y la condiciones topográficas, estratigráficas y de localización del sitio, debe considerarse la disponibilidad del equipo de hincado.

1.3.1 CON DESPLAZAMIENTO.

En este tipo de pilotes se presenta el desplazamiento del suelo en volumen igual al del mismo pilote, es decir el suelo es desplazado y el pilote ocupa el volumen del suelo desplazado. Dentro de éste tipo de pilotes se puede mencionar los siguientes:

1.3.1.1 Pilotes hincados a percusión.

Este procedimiento es de los más usados y consiste en hincar a percusión los pilotes con ayuda de un martillo de impacto; los factores a considerarse son:

- La masa y longitud del pilote.
- El peso y la energía del martillo.
- El tipo de suelo en que se hinca.

El pilote (ya sea inclinado o vertical) se sostiene con una estructura guía, en la que desliza durante la maniobra (ver figura 1.8). Cuando por su longitud el pilote no puede ser manejado en un solo tramo, es hincado en dos o más de ellos, unidos con junta rápida o con placas prefijadas en los extremos que son soldadas durante el hincado.

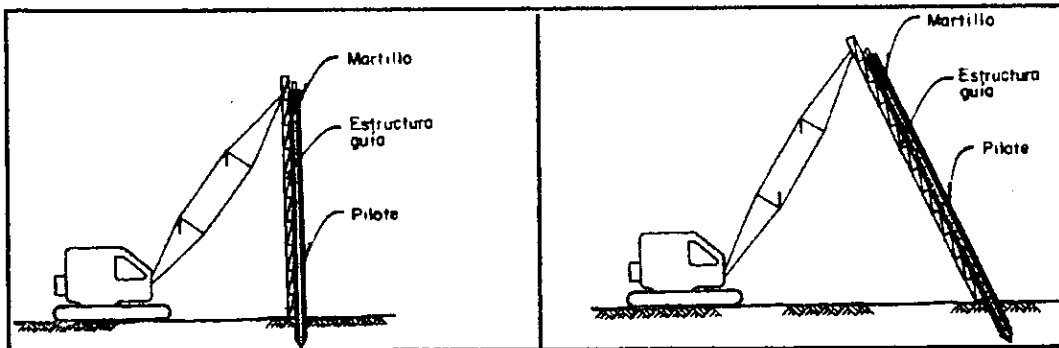


FIGURA 1.8 Pilote hincado, vertical e inclinado.

Cuando existen restricciones de espacio o se trata de obras fuera de costa se hace necesaria la utilización de guías colgantes, que son sostenidas por la pluma de una grúa y unos cables (Ver figura 1.9).

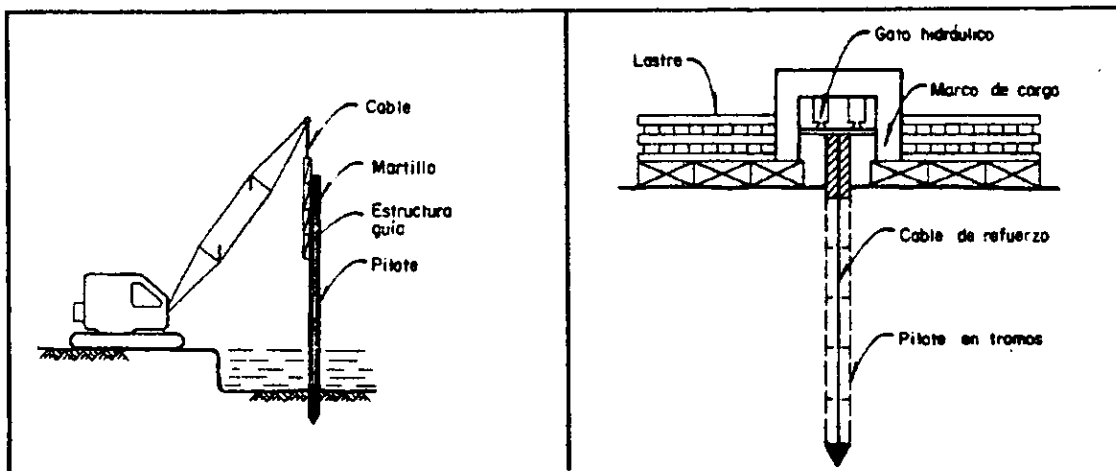


FIGURA 1.9 Pilote hincado con guía colgante.

FIGURA 1.10 Pilote hincado a presión.

1.3.1.2 Pilotes hincados a presión.

Estos pilotes se fabrican de concreto en tramos de sección cilíndrica de 1.5 m de largo; la punta es cónica y tiene ahogado el cable de acero de refuerzo que se aloja en el hueco central. El hincado se realiza a presión, con un sistema hidráulico en cuyo marco de carga se van colocando los pilotes. (ver figura 1.10).

Cuando se alcanza la presión máxima de proyecto se tensa el cable central de acero de refuerzo y se rellena el hueco de concreto. La reacción del sistema de carga se absorbe usualmente con lastre colocado en una plataforma.

Este procedimiento es usado en recimentaciones, en las que la reacción del sistema de carga es soportada con el peso de la estructura y gracias a esto se puede realizar en espacios verticales reducidos.

1.3.1.3 Pilotes hincados con vibración.

Este proceso es usado en suelos granulares y consiste en excitar el pilote por medio de un vibrador pesado de frecuencia controlada, formando una carga estática y un par de contrapesos rotatorios excéntricos en fase. El pilote penetra por influencia de las vibraciones y el peso del conjunto pilote – vibrador – lastre. Generalmente son pilotes metálicos. (Ver figura 1.11)

Esta técnica también ha sido utilizada para extracción de pilotes desviados o cimentaciones antiguas.

Antes de aplicar este método debe estudiarse los efectos que pueda ocasionar la vibración, cuando la frecuencia del vibrohincador se acerque a la frecuencia natural de la estructuras e instalaciones vecinas, especialmente cuando se encuentran cimentadas sobre materiales poco densos, ya que podría presentarse el fenómeno de resonancia, causando daño estructural y hundimientos no previstos.

1.3.2 CON POCO DESPLAZAMIENTO.

1.3.2.1 Pilotes hincados en una perforación previa.

Los pilotes hincados antes descritos como pilotes de desplazamiento, se transforman en pilotes de poco desplazamiento si antes de hincarlo se realiza una perforación previa (Ver figura 1.12). Esta puede necesitar ser estabilizada con lodo de perforación, que en suelos arcillosos blandos se puede formar con una mezcla de suelo y agua, o de bentonita y agua.

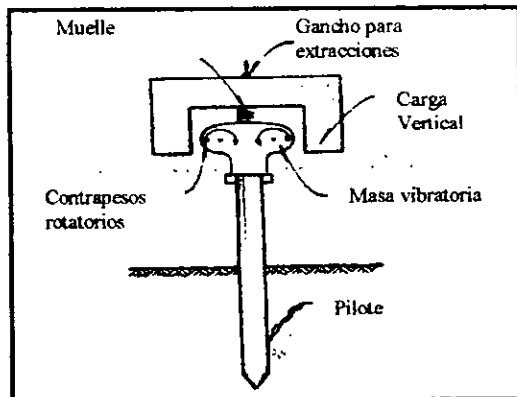


FIGURA 1.11 Pilote hincado a vibración.

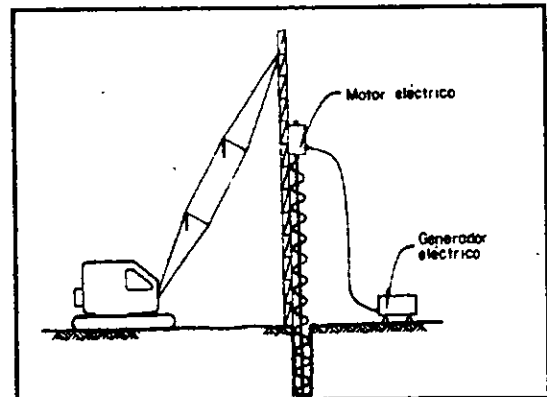


FIGURA 1.12 Perforación previa al hincado.

Esta técnica es utilizada:

- Cuando el hincado de pilotes induce deformaciones que reducen la resistencia al esfuerzo cortante del suelo.
- Cuando el pilote debe atravesar estratos duros que dificulten su hincado y puedan llegar a dañarse estructuralmente.
- Cuando el número de pilotes es alto y la suma de sus desplazamientos puede provócale levantamiento del terreno y arrastrar a los pilotes previamente hincados.

1.3.2.2 Pilotes hincados con chiflón.

Esta técnica es utilizada para disminuir la cantidad de suelo desplazado durante el hincado de pilotes en arena, aunque en ocasiones se ha utilizado en arcillas; consiste en aplicar dos efectos simultáneos: el del chiflón de agua a presión, que descarga en la punta del pilote, el cual erosiona y transporta a la superficie parte de la arena, combinado con los impactos de un martillo o la excitación de un vibrador para movilizar el pilote. (Ver figura 1.13 y 1.14). Adicionalmente puede agregarse agua a presión para facilitar la extracción del agua. En pilotes de varios tramos hay

dificultades de continuidad en el chiflón. El martinete debe usarse una vez que ha dejado de operar el chiflón y cuando se deba llegar al rechazo.

1.3.2.3 Pilotes de área transversal pequeña.

Comúnmente los perfiles de acero se encuentran en este grupo de pilotes, debido a que la relación de su perímetro al área transversal es hasta 15 veces mayor que en pilotes de concreto, debe cuidarse que no se forme un tapón de suelo cercano a los patines, si este tapón avanza con el hincado, el pilote se convierte en pilote con desplazamiento.

En ocasiones se aplica un tratamiento eléctrico de corta duración, posterior al hincado, para incrementar la adherencia entre suelo y pilote; cuando sucede esto se puede utilizar también tubos.

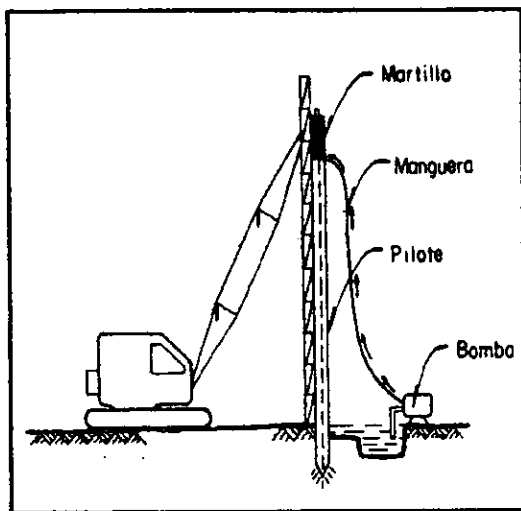


FIGURA 1.13 Pilote hincado con chiflón.

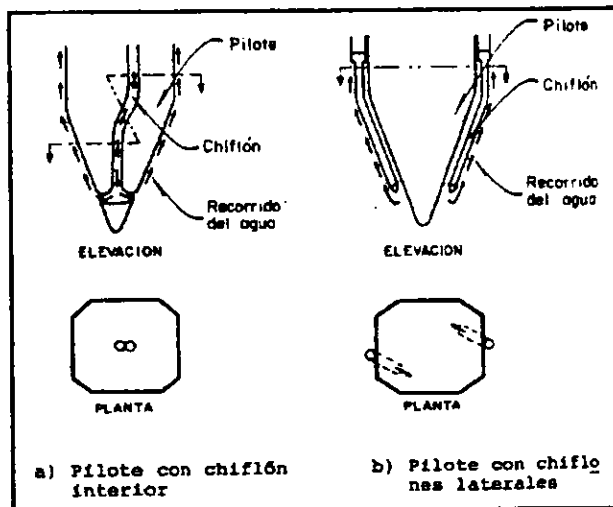


FIGURA 1.14 Ubicación de chiflones en la punta del pilote.

1.3.3 PILOTES SIN DESPLAZAMIENTO.

1.3.3.1 Pilotes colados in situ.

Los pilotes de concreto colados en el lugar se clasifican como elementos de cimentación sin desplazamiento porque para su fabricación se extrae un cierto volumen de suelo que después es ocupado por el concreto. Como ya se ha mencionado este tipo de pilotes en general tiene poca aplicación, debido a que tienen mayor difusión las pilas.

1.4 PILOTES ESPECIALES.

1.4.1 PILOTES DE CONTROL

Los pilotes de control forman parte de un sistema de cimentación, ideado por el Ing. Manuel González Flores, con el fin de utilizar la máxima capacidad de carga y (en forma controlada) toda la resistencia que pueda proporcionar el conjunto terreno pilotes. Este sistema es una solución práctica y eficiente a las graves dificultades de cimentación que representan suelos arcillosos y compresibles, con altos contenidos de humedad natural de diversos lugares del mundo, entre ellos los de ciudades como México y Tokio. Los pilotes de control deben trabajar apoyados en la capa dura, se pueden clasificar comparando su longitud con la profundidad a la que se encuentra esa capa, de tal manera, que los que no alcancen dicha profundidad trabajarán como pilotes de

fricción, los que tengan una longitud mayor que la de la capa se pueden clasificar como inclinados o rotos; en ambos casos tampoco tienen un comportamiento confiable como pilotes de punta. Es posible de igual forma que el pilote atraviese la capa dura, debido a la técnica de hincado que se utilice, en este caso el pilote sería de punta y fricción

Estos pilotes están equipados con un dispositivo que permite regular la carga tomada por cada pilote y los movimientos de la construcción respecto al área circundante.

Para entender con mayor facilidad la problemática del subsuelo de la Ciudad de México que hace necesaria la utilización de este tipo de pilotes se presenta la siguiente analogía:

Si se toma una muestra de suelo a 5 m de profundidad (cuyo porcentaje de agua es de más del 80%). Supóngase que dicha muestra es confinada en un cilindro y se coloca un émbolo perforado que permitirá la salida del agua. Posteriormente el émbolo es presionado lentamente, provocando la salida del agua, entonces se conocerá el volumen máximo de suelo sólido (*Ver figura 1.15*). Este proceso, analizado en pequeña escala, es lo que sucede en el subsuelo de la Ciudad de México.

Es decir, debido a la extracción de grandes cantidades de agua del subsuelo, los edificios cimentados por superficie sufren grandes deformaciones por el gran asentamiento del suelo, además, los edificios cimentados sobre pilotes de punta en el primer estrato de arena van sobresaliendo, ya que no pueden seguir la disminución sufrida por el suelo y junto con el edificio quedan a desnivel respecto de aceras o banquetas, calles y demás edificios.

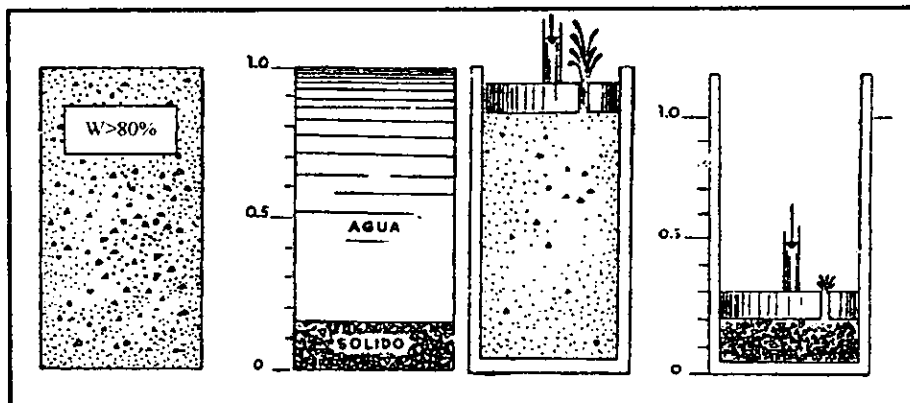


FIGURA 1.15 Esquema de deformación del suelo.

Para evitar los daños que la deformación anterior puede ocasionar a las estructuras se ha implementado el uso de pilotes de control. La diferencia esencial entre un pilote de control y uno fijo consiste en que, el segundo se apoya directamente sobre la cabeza del pilote, quedando debajo de la cimentación del mismo edificio, sin posibilidad de aumentar o disminuir la carga que soporta.

La principal característica del pilote de control es que atraviesa la cimentación, generalmente a un costado de las trabes y muy cerca de las columnas, con la ventaja que puede deslizarse verticalmente con la propia cimentación. En la *figura 1.16* se muestra un esquema de la diferencia entre pilotes de punta y pilotes de control. En esta figura puede observarse el efecto de la llamada "fricción negativa", que sobrecarga el pilote y resta capacidad de carga al pilote.

Debido a esto es conveniente aprovechar la ayuda que brinda la adherencia, permitiendo que los pilotes penetren dentro de la cimentación, logrando así que el edificio se apoye constantemente sobre el terreno, de modo que descienda verticalmente al perder agua y no se cuelgue del pilote, permitiendo controlar los movimientos en la estructura.

Para el hincado de pilotes de control no se usa percusión, son introducidos por su propio peso dentro de una perforación realizada momentos antes.

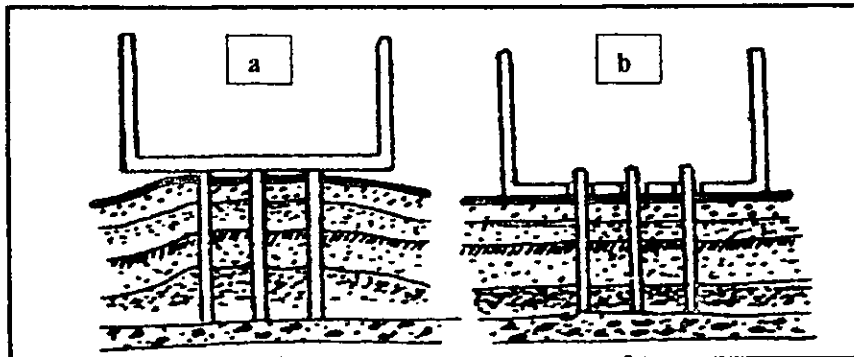


FIGURA 1.16 Diferencia entre pilotes de punta y de control.

- a) Estructura sobre pilote de punta
- b) Estructura sobre pilote de control.

El mantenimiento de los pilotes de control es el aspecto que generalmente encarece este tipo de cimentación, esto porque continuamente hay que regular la deformación sufrida por el edificio, de tal manera que se controlen los desplazamientos de éste con respecto a las estructuras colindantes.

En las figuras 1.17 y 1.18 se muestra la sección de un pilote de control y la manera en que quedan instalados.

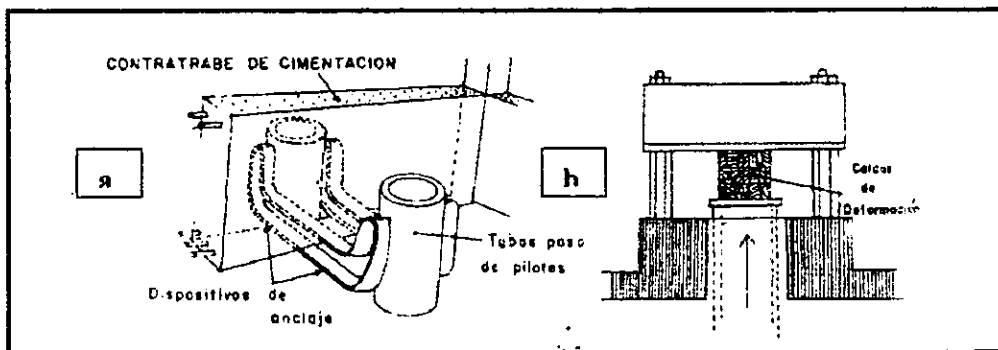


FIGURA 1.17 a) Dispositivo de anclaje.
b) Dispositivo para medir el aumento en carga.

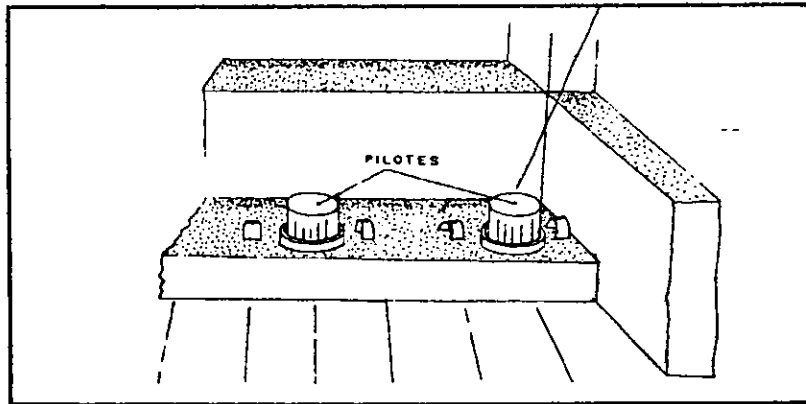


FIGURA 1.18 Ubicación del pilote en la cimentación.

1.4.2 PILOTES ENTRELAZADOS.

Este tipo de pilotes es utilizado en zonas de arcillas altamente compresibles, como el de la Ciudad de México, como es bien sabido en este tipo de suelos se somete al pilote a un exceso de carga provocado por la fricción negativa. En esta clase de pilotes la resistencia está dada por un tipo A de pilotes, que trabajan a fricción y pilotes tipo B, que tienen la particularidad de no estar conectados directamente a la cimentación, los pilotes del tipo B son hincados hasta apoyarse en la capa dura y reciben toda su carga de la fricción negativa. De esta manera se evita que la capacidad de carga sea disminuida por el efecto de la fricción negativa.

Existen varios casos en los que el tipo B de pilotes ha sido instrumentado para cuantificar la fricción negativa. La instrumentación es a base de gatos planos Freyssinet, previamente calibrados, que se colocan entre dos tramos de pilote y se rodean de casquillos para mantener el alineamiento. En la *figura 1.19* se muestra esquemáticamente la disposición de este tipo de pilotes.

1.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS TIPOS DE PILOTES.

Los diferentes tipos de pilotes antes descritos presentan ventajas y desventajas características que deben de tenerse presentes en el momento de seleccionar el tipo de pilote para que éste sea el más adecuado a las características de la obra que se trate.

1.5.1 Pilotes con desplazamiento.

1.5.1.1 Pilotes hincados y colados in situ.

Ventajas.

- 1- Facilitan alcanzar estratos resistentes.
- 2- Es sencillo ajustar su longitud.
- 3- Pueden formarse de bases acampanadas para aumentar el área de soporte en la punta o para compactar suelos granulares.
- 4- Pueden hincarse con extremo superior cerrado para controlar los efectos del agua del terreno.

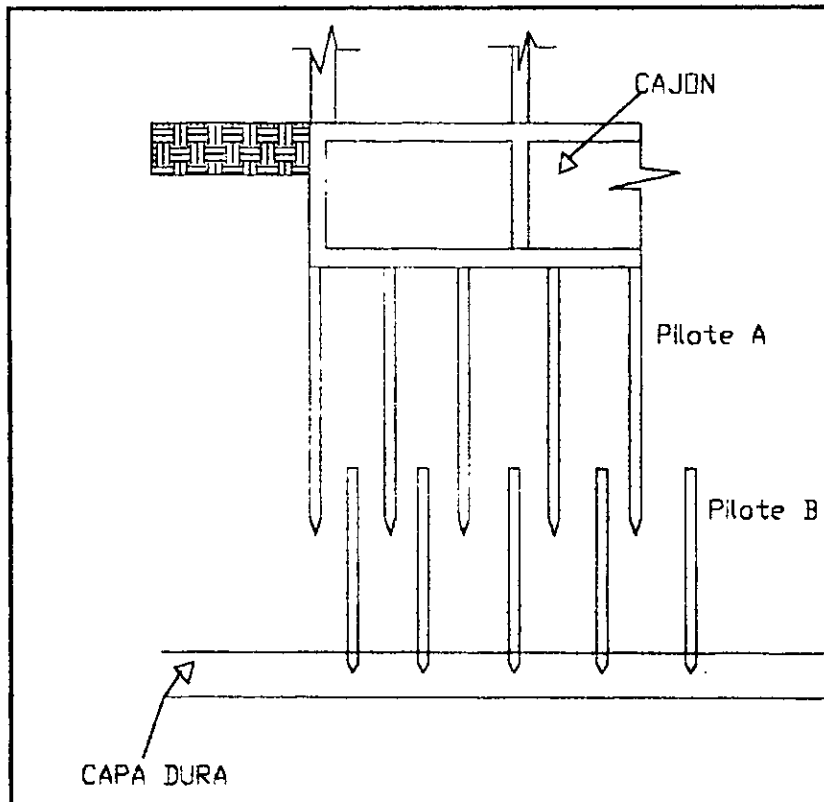


FIGURA 1.19 Pilotes entrelazados.

Desventajas.

- 1- El desplazamiento horizontal y vertical del suelos puede ser nocivo por la alteración del suelo, estructuras instalaciones y servicios vecinos y para pilotes previamente construidos.
- 2- No es posible inspeccionar el concreto después de colado.
- 3- El concreto puede debilitarse por la acción de aguas a presión que fluyen alrededor del pilote colado.
- 4- Secciones livianas de acero o corazas prefabricadas de acero pueden dañarse o deformarse durante el hincado.
- 5- La longitud en concretos prefabricados de concreto armado está limitada por los grandes esfuerzos inducidos por el transporte e izado.
- 6- El ruido, vibración e impacto pueden producir trastornos o deteriorar estructura o edificaciones vecinas.
- 7- No pueden hincarse diámetros muy grandes del fuste.
- 8- En espacios reducidos es muy difícil maniobrar los equipos.

Son usuales longitudes de hasta 24 m. y las cargas por pilote son muy variables.

1.5.1.2 Pilotes de Concreto reforzado, preesforzado, prefabricados e hincados.

Ventajas.

- 1 Pueden alcanzar con la punta estratos predeterminados de apoyo.
- 2 Son estables en terrenos que fluyen, como arcillas blandas, limos y turbas.
- 3 Es posible inspeccionar el pilote antes del hincado.
- 4 En caso de ser desplazados por levantamiento del terreno, pueden ser rehincados.

- 5 El nivel freático no afecta el proceso constructivo.
- 6 Pueden hincarse en tramos largos.
- 7 Pueden usarse para la compactación en suelos granulares sueltos.

Desventajas.

- 1 El desplazamiento del suelo puede ocasionar problemas similares a los descritos en el caso anterior.
- 2 Es difícil variar su longitud.
- 3 Pueden deteriorarse durante el hincado.
- 4 El refuerzo del concreto queda controlado más por los esfuerzos originados en el transporte, izado y el hincado, que por los provenientes de las cargas normales de trabajo del pilote.
- 5 No pueden hincarse diámetros muy grandes o en condiciones de espacio limitado.
- 6 Ruido, vibración e impacto causan problemas.

En pilotes de concreto reforzado son usuales longitudes de 12 a 15 m, para preesforzados de 18 a 30 m.

1.5.1.3 Pilotes de madera. Ventajas-Desventajas.

Los pilotes de madera son livianos, de fácil manejo y en algunos países económicos. Pueden empalmarse y reforzarse para el hincado. Estos pilotes son altamente degradables por agentes biológicos e insectos perforadores. Por lo general se utilizan bajo el nivel freático, pueden protegerse con sustancias químicas cuando se encuentren por encima del nivel antes mencionado. Se puede reducir los daños provocados por el hincado reduciendo el peso (se puede igualar el del martillo al peso del pilote) y altura de caída del martillo.

Son usados generalmente como pilotes trabajando a fricción, con longitudes de hasta 20 m y los diámetros que presentan en forma natural los árboles en la región de que se trate.

1.5.2 Pilotes con poco desplazamiento. Secciones H y Tubos.

Ventajas:

1. Fácil manejo.
2. Resisten hincado fuerte o violento.
3. Pueden hincarse en grandes longitudes y ésta se puede modificar.
4. Tienen alta capacidad de carga.
5. Pueden anclarse en superficies rocosas muy inclinadas.

Desventajas.

1. Son susceptibles a la corrosión.
2. Los pilotes H pueden sufrir deflexiones en el hincado, cuando se presentan obstrucciones.
3. Son costosos, a menos que el estrato resistente permita desarrollar una elevada capacidad de carga.

Su empleo es ventajoso a longitudes de 12 a 50 m, aunque se han logrado longitudes mayores a los 100 m.

1.5.3 Pilotes sin desplazamiento.

Ventajas.

1. Es fácil variar su longitud.
2. No existe riesgo de levantamiento del terreno.
3. Puede realizarse una inspección del perfil estratigráfico y compararlo con los resultados de la investigación del subsuelo.
4. Pueden instalarse pilotes de grandes dimensiones (longitud y diámetro) y con ensanchamiento en la base.
5. El costo del refuerzo no aumenta debido a condiciones de manejo e hincado.
6. Pueden instalarse sin ruido ni vibraciones de importancia y en condiciones de espacio limitado.

Desventajas.

1. La perforación puede causar relajación de esfuerzos en suelos arenosos, gravas, o convertir roca blanda en lodo.
2. Pueden sufrir adelgazamiento o estrangulamiento en terrenos inestables, cuando el concreto está fresco.
3. Cuando el colado es debajo del agua resulta muy problemático.
4. No se puede colocar el concreto después de colado.
5. Existe flujo de agua hacia del suelo al concreto, esto altera la calidad del concreto o reducir la capacidad de carga del suelo.
6. No es posible utilizar bases acampanadas en suelos granulares sueltos.

Se usan en longitudes de hasta 50 m y diámetros muy variables.

1.5.4 Pilotes especiales.**1.5.4.1 Pilotes de control.****Ventajas.**

- 1 Se puede controlar los asentamientos de la estructura inducidos por asentamiento regional.
- 2 Con su uso se eliminan los efectos de la fricción negativa.
- 3 Se aprovecha toda la capacidad de carga de los pilotes.
- 4 Se tiene un estricto control sobre las cargas aplicadas a estos pilotes.

Desventajas.

- 1 Su construcción requiere de personas especializadas en pilotes de control.
- 2 Se necesita de aditamentos especiales para la instalación de este tipo de pilotes.
- 3 El encarecimiento provocado por el continuo mantenimiento de el sistema para el control de la carga es la principal desventaja de este tipo de pilotes.

1.5.4.2 Pilotes entrelazados.**Ventajas.**

- 1 Se eliminan los efectos de la fricción negativa.
- 2 Se disminuye el efecto de los asentamientos del suelo.
- 3 Posibilidad de instrumentar los pilotes para conocer la magnitud de la fricción negativa.

Desventajas.

1. Alteración del suelo cercano a los pilotes apoyados en el estrato duro, debida al hincado de los mismos.
2. Dificultades constructivas debidas a las características de este tipo de pilotes.

CAPITULO II.

MATERIALES DE CONSTRUCCION.

CAPÍTULO II MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN .

En el presente capítulo se describen los materiales comúnmente empleados en la construcción de pilotes, de igual manera se mencionan las normas en las que se establecen las características y requerimientos que debe tener cada uno de estos materiales, para que el pilote cumpla con los requisitos de calidad, seguridad y economía.

2.1 ACERO DE REFUERZO.

El acero de refuerzo debe satisfacer los requisitos de calidad establecidos en las normas NOM-B-6-1980 y ASTM A 615-78 (Standard Specificationa for Deformed and Plain Billet Steel Bars for Concrete Reinforcement) "Especificaciones para Varillas Lisas y Corrugadas de Lingote o Palanquilla para Refuerzo de Concreto" y, por consiguiente, cumplir con los requisitos químicos de corrugación, de tensión y de doblez, ahí indicados. Los ensayos para verificar dichos requerimientos se efectuarán conforme a la norma ASTM A 370-77 (Standard Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products) "Normas de Prueba y Definiciones para Ensayos Mecánicos de Productos de Acero".

La norma ASTM A 615-78 contempla el uso de dos tipos de acero, designándolos con el valor del esfuerzo a tensión en su punto de fluencia. Así, los denomina acero Grado 40 ($f_y=40\ 000\ \text{lb/pulg}^2=2,800\ \text{kg/cm}^2$) y Grado 60 ($f_y=60,000\ \text{lb/pulg}^2=4,200\ \text{kg/cm}^2$).

Los requerimientos químicos tienen por objeto la determinación de los contenidos de carbón, manganeso, fósforo y azufre, de muestras tomadas durante el colado de la homada. Para esta condición se limita el contenido máximo de fósforo al 0.05%.

El cliente puede exigir análisis químicos del acero de las varillas que está comprando. El contenido de fósforo, determinado en muestras tomadas de un lote ya salido de la fábrica, no debe ser mayor de 0.062%.

En las tablas 2.1 y 2.2 se dan los valores nominales a los que se deben ajustar las propiedades físicas del acero de refuerzo, en cuanto a diámetro, peso, altura y espaciamiento de las deformaciones o corrugaciones, área y perímetro, así como los esfuerzos de fluencia y de ruptura.

Para los requisitos químicos generales, ver la norma ASTM A 510-77 (Specifications for General Requirements for Wire Rods and Coarse Round Wire, Carbon Steel) "Requisitos Generales para Varillas Lisas y Alambre Grueso Redondo de Acero al Carbón"

El acero de refuerzo que se produce en México tiene las características indicadas, en la tabla 2.3.

2.2 CONCRETO.

El concreto es una mezcla formada de agregados pétreos que se encuentran embebidos en un cementante. En concretos hidráulicos, que son los que se utilizan en la fabricación de pilotes, el cementante está constituido por una pasta de cemento y agua.

Los agregados pétreos están constituidos por una combinación de agregado fino (arena) y agregado grueso (grava), la proporción debe satisfacer lo establecido en la norma ASTM C 33-81.

Cuando se requiere mejorar las características del concreto, debido a condiciones específicas en el clima del lugar o la colocación del concreto, se hace necesaria la utilización de un elemento

adicional, un aditivo, que puede ser químico o mineral, líquido o en polvo y que se incorpora a la mezcla mediante el agua (si es líquido) o mediante la arena o cemento (si es en polvo).

Número para identificar la varilla, No. ^B	Peso nominal kg/m	Dimensiones nominales ^A			Requisitos para las corrugaciones, mm		
		Diámetro mm	Sección transversal cm ²	Perímetro mm	Espaciamiento máximo promedio	Altura mínima promedio	Espacio libre máximo (12 1/2% del perímetro nominal)
3	0.560	9.52	0.71	29.9	6.7	0.38	3.5
4	0.994	12.70	1.29	39.9	8.9	0.51	4.9
5	1.552	15.88	2.00	49.9	11.1	0.71	6.1
6	2.235	19.05	2.84	59.8	13.3	0.96	7.3
7	3.042	22.22	3.87	69.8	15.5	1.11	8.5
8	3.973	25.40	5.10	79.8	17.8	1.27	9.7
9	5.059	28.65	6.45	90.0	20.1	1.42	10.9
10	6.403	32.26	8.19	101.4	22.6	1.62	11.4
11	7.906	35.81	10.06	112.5	25.1	1.80	13.6
14	11.384	43.00	14.52	135.1	30.1	2.16	16.5
18	20.238	57.33	25.81	180.1	40.1	2.59	21.9

A Las dimensiones nominales de una varilla corrugada son equivalentes a las de una varilla lisa que tenga el mismo peso por unidad de longitud que la varilla corrugada.

B Los números que identifican a las varillas, son iguales al número de octavos de pulgada que contiene el diámetro nominal de las varillas.

TABLA 2.1 Números para identificar varillas corrugas, pesos y dimensiones nominales, requisitos para corrugaciones.

	Grado 40 ^A	Grado 60
Resistencia a la tensión, mínima, MPa (psi)	483 (70 000)	621 (90 000)
Límite de fluencia, mínimo, MPa (psi)	276 (40,000)	414 (60,000)
Alargamiento en 203 mm (8 pulg), mínimo, % :		
Varilla No.		
3	11	9
4, 5, 6	12	9
7	11	8
8	10	8
9	9	7
10	8	7
11	7	7
14, 18	--	7

A Las varillas de grado 40 se suministran solo en tamaños 3 a 11. Los tamaños 7 a 11 no son fáciles de conseguir.

TABLA 2.2 Requisitos de Tensión.

Fuente: DGN-V-32-1972					
Varilla No.	Diámetro		Peso kg/m	Area cm ²	Perímetro cm
	mm	pulg			
2	6.3	1/4	0.248	0.32	1.99
2.5	7.9	5/16	0.384	0.49	2.48
3	9.5	3/8	0.566	0.71	2.98
4	12.7	1/2	0.994	1.27	3.99
5	15.9	5/8	1.552	1.98	5.00
6	19.0	3/4	2.235	2.85	6.00
7	21.2	7/8	3.042	3.88	6.97
8	25.4	1	3.973	5.07	7.98
9	28.6	1 1/8	5.033	6.42	8.99
10	31.8	1 1/4	6.255	7.94	9.99
12	38.1	1 1/2	8.938	11.40	11.97

A Todas estas varillas, exceptuando la del No. 2, son corrugadas y pueden obtenerse con el límite de fluencia 2300 o 4200 kg/cm². La varilla del # 7 no se encuentra comercialmente.

TABLA 2.3 Características de varillas de acero fabricadas en México.

El proporcionamiento de la mezcla debe satisfacer la norma ACI 211.1-77 (Recommended Practice for Selecting Proportions for Normal and Heavyweight Concrete) "Práctica Recomendada para el Proporcionamiento del Concreto Normal y Pesado".

La fabricación del concreto debe de satisfacer la norma ACI 304-73 (Recommended Practice for measuring, Mixing, Transport and Placing Concrete) "Práctica Recomendada para Medir, Mezclar, Transportar y Colocar el Concreto".

Para el control de calidad del concreto mediante el muestreo de especímenes cilíndricos estándar de 6" y 12" se deberá cumplir con lo establecido en las siguientes normas:

ASTM C 143-78	Slump Test of Portland Cement Concrete
NOM C 156-1978	Determinación del revenimiento del Concreto fresco
ASTM C 138-77	Unit Weight, Yield and Air Content of Concrete
NOM C 162-1976	Determinación del Contenido de Aire, Peso Volumétrico y Revenimiento del Concreto.
ASTM C 172-71	Sample Fresh Concrete
NOM C 161-1974	Muestreo de Concreto Fresco.
ASTM C 143-78	Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
NOM C 156-1978	Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto.
ASTM C 617-76	Capping Cylindrical Concrete Specimens
NOM C 109-1977	Cabeceo de Especímenes Cilíndricos de Concreto.
ASTM C 31-69	Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field.
NOM C 160-1976	Elaboración y Curado en Obra de Especímenes de Concreto.

Para la evaluación de los resultados del control de calidad, se seguirán los requerimientos de la norma ACI 214-77 (Recommended Practice for Evaluation of Compression Test Results of Field Concrete) "Práctica Recomendada para la Evaluación de Resultados de Ensayos de Compresión del Concreto en el Campo".

En las tablas 2.4 y 2.5 se presentan los requisitos que en cuanto a uniformidad y resistencia debe satisfacer el concreto.

Fuente: ASTM C 94-81.

P r u e b a	Requisitos, expresados como la diferencia máxima permisible en resultados de ensayos sobre muestras tomadas en dos sitios de la batchada de concreto
Peso por metro cúbico (pie cúbico) calculado sobre la base de libra de aire, kg/m ³ (lb/pie ³)	16(1.0)
Contenido de aire, % en volumen de concreto	1.0
Revenimiento:	
Si el revenimiento promedio es de 102 mm (4 pulg) o menos, mm (pulg)	25(1.0)
Si el revenimiento promedio es de 102 a 152 mm (4 a 6 pulg), mm (pulg)	38(1.5)
Contenido de agregado grueso, porción en peso de cada muestra retenida en la malla No. 4 (4.75mm), %	6.0
Peso unitario de mortero libra de aire ^b basado en el promedio de todas las muestras comparativas ensayadas, %	1.6
Resistencia a la compresión promedio a 7 días para cada muestra, ^c basada en el promedio de resistencia de todos los especímenes de prueba comparativos, %	7.5 ^c

^a "Pruebas para la variabilidad de los constituyentes del concreto", Designación 26, Manual del Concreto del Bureau of Reclamation, 7^a. Edición. Disponible por medio del Superintendente de Documentos, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C. 20402.

^b Deben moldearse y probarse no menos de 3 cilindros de cada muestra.

^c Puede concederse la aprobación tentativa de la mezcla dependiendo de los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión a 7 días.

TABLA 2.4. Requisitos para uniformidad del concreto.

2.2.1 Agua.

El agua para la fabricación de los lodos de perforación y del concreto deberá ser potable, limpia, fresca y libre de materia orgánica e inorgánica, ácidos y álcalis, en suspensión o solución en cantidad tal que puedan afectar la calidad y durabilidad del lodo o del concreto. Podrá obtenerse de fuentes públicas o de pozos pero no de las excavaciones.

No deberá usarse agua de mar o agua salada, salvo para la preparación de lodos siempre que se incorporen aditivos para hacer viable su utilización.

En las tablas 2.6 y 2.7 se definen los criterios de aceptación para fuentes de agua de calidad dudosa.

Las pruebas para determinar la aceptación del agua para la fabricación de lodo o concreto, se realizarán de acuerdo a la norma AASHTO T26 (Quality of Water to be Used in Concrete) "Calidad del Agua para ser Usada en Concreto".

Fuente: ASTM C 94-81

Requisitos de resistencia promedio para la probabilidad límite de pruebas que caen por abajo de la resistencia especificada, f'_c , de una que no cumple por cada diez ensayos					
Coefficiente de variación	5	10	15	20	25
Factor de sobrediseño requerido	1.07	1.15	1.24	1.34	1.47
Resistencia de diseño	Resistencia promedio requerida ^A				
2000psi (140kg/cm ²)	2140	2300	2480	2680	2940
2500psi (175kg/cm ²)	2675	2875	3100	3350	3675
3000psi (210kg/cm ²)	3210	3450	3720	4030	4420
3500psi (245kg/cm ²)	3745	4025	4340	4690	5145
4000psi (280kg/cm ²)	4270	4590	4960	5380	5890
4500psi (315kg/cm ²)	4815	5175	5580	6030	6615
5000psi (350kg/cm ²)	5340	5740	6200	6720	7360
Requisitos de resistencia promedio para la probabilidad límite de pruebas que caen por abajo de la resistencia especificada, f'_c , de una que no cumple por cada cinco ensayos.					
Coefficiente de variación	5	10	15	20	25
Factor de sobrediseño requerido	1.04	1.09	1.14	1.20	1.27
Resistencia de diseño	Resistencia promedio requerida ^A				
2000psi (140kg/cm ²)	2080	2180	2280	2400	2450
2500psi (175kg/cm ²)	2600	2725	2850	3000	3180
3000psi (210kg/cm ²)	3120	3270	3420	3600	3810
3500psi (245kg/cm ²)	3640	3820	3990	4200	4450
4000psi (280kg/cm ²)	4160	4360	4560	4800	5080
4500psi (315kg/cm ²)	4680	4910	5130	5400	5720
5000psi (350kg/cm ²)	5200	5450	5700	6000	6350
^A Calculada de la ecuación 7 y con valores de "n" para más de 30 muestras de la tabla 4 (ACI 214-65). En la ausencia de experiencia estadística debe considerarse un coeficiente de variación de 20%.					

TABLA 2.5 requisitos de resistencia.

Fuente: ASTM C 685-79.

	Límites	Métodos de ensaye.
Resistencia a la compresión, % mínimo del control a los 7 días.	90	C 109 ^A
A Tiempo de fraguado, desviación del control, horas: minutos.	A lo más Desde 1:00 Temprano. A 1:30 Cuanto más tarde.	C 191 ^A
^A Las comparaciones deben basarse en proporciones fijas, utilizando el mismo volumen de agua de prueba que en la mezcla de control donde se usa agua potable de la ciudad o agua potable.		

TABLA 2.6 Criterios de aceptación para fuentes de agua de calidad dudosa

Tomado de : ASTM 685-79.

	Límites	Método de ensaye ^A
Requisitos químicos, concentraciones máximas en el agua de mezclado, ppm^B		
Cloruro como Cl, ppm:		D 512
Concreto presforzado o en losas de puentes	500 ^C	
Otros concretos reforzados en ambiente húmedo o conteniendo insertos de aluminio o metales parecidos o con cimbras permanentes de metal galvanizado	1 000 ^C	
Sulfato como SO ₄ , ppm	3 000	D 516
Alcalis como (Na ₂ O + 0.658 K ₂ O), ppm	600	
Sólidos totales, ppm	50 000	AASHTO T26
A Pueden usarse otros métodos que hayan demostrado conducir a resultados comparables		
B El agua de lavado reutilizada como agua de mezclado en el concreto, puede exceder las concentraciones indicadas de cloruros y sulfatos, si se puede demostrar que la concentración calculada en el agua total de mezclado incluyendo el agua de mezclado en los agregados y en otras fuentes no excede los límites establecidos.		
C Cuando se permite el uso de CaCl₂ como aditivo acelerante, el comprador puede desistirse de la limitación de cloruro.		

TABLA 2.7. Limitaciones químicas para agua de lavado.

2.2.2 Agregados pétreos para el concreto.

La calidad del concreto depende en gran medida de la adecuada selección de las características de los materiales que lo forman, es por ello que los agregados tanto el grueso (grava) como el fino (arena), deben cumplir con los requisitos de la Norma ASTM C 33-81 (Standard Specifications for Concrete Aggregates) "Especificaciones Estándar para Agregados de Concreto".

2.2.2.1 Agregado fino.

El agregado fino está formado por arena natural, arena procesada o por una combinación de ambas y deberá satisfacer las condiciones granulométricas mostradas en la tabla 2.8.

El módulo de finura debe variar entre 2.3 y 3.1. Cuando se va a usar concreto con aire incluido, el porcentaje mínimo que pasa por las mallas # 50 y 100 puede reducirse en 5 y 0% respectivamente.

El contenido de materia orgánica debe limitarse mediante la prueba de colorimetría (ASTM C 40-79), se debe rechazar la arena cuyo color sea más oscuro.

En la prueba de sanidad e intemperismo acelerado (ASTM 88-76) la pérdida no debe ser mayor al 10% cuando se utilice sulfato de sodio y del 15% cuando se utilice sulfato de magnesio.

2.2.2.1 Agregado Grueso.

El agregado grueso es grava natural, grava triturada, roca triturada, escoria de fundición o una mezcla de estas que cumpla con los requerimientos de granulometría que establece la norma ASTM C 33-81. Ver tabla 2.10.

Si el agregado fino o grueso no satisface los requerimientos de la norma C 33-81, pero su uso, en determinada región ha resultado satisfactorio en cuanto a calidad y durabilidad del concreto, queda a criterio del dueño la aceptación del o de los agregados del concreto.

Fuente: ASTM C 33-81

M a l l a		% que pasa, en peso
mm	pulg	
9.50	3/8	100
4.75	No. 4	95-100
2.36	8	80-100
1.16	16	50-85
0.60	30	25-60
0.30	50	10-30
0.15	100	2-10
0.07	200	0-5

TABLA 2.8 Requisitos granulométricos del agregado fino.

Fuente: ASTM C 33-81

Concepto	Porcentaje en peso del total de la muestra máx
Terrones de arcilla y partículas desmenuzables	3.0
Material más fino que la malla No. 200 (75µm):	
Concreto sujeto a abrasión	3.0 ^A
Los demás concretos	5.0 ^A
Carbón y lignito:	
Donde la apariencia superficial del concreto es importante	0.5
Los demás concretos	1.0
En el caso de arena procesada, si el material más fino que la malla No. 200 (75 µm) consiste de polvo del fracturamiento, esencialmente libre de arcilla o pizarra, estos límites pueden incrementarse a 5.0 y 7.0% respectivamente.	

TABLA 2.9 Límites para sustancias deletéreas en agregado fino para concreto.

2.2.3 Cemento pórtland.

El cemento pórtland es el producto obtenido de la trituración del clinker y consta principalmente de silicatos hidráulicos de calcio. Debe satisfacer los requerimientos establecidos en la norma ASTM C 150-81 (Standar Specifications for Pórtland Cement) "Especificaciones para Cementos Pórtland", que cubre las características de ocho tipos de cemento, de los cuales cuatro se fabrican comúnmente en México, y que se mencionan a continuación:

Tipo I	Condiciones Normales	Para usarse en condiciones normales, es decir, cuando no se requieren las propiedades especiales que se especifican para otros cementos.
Tipo II	Uso general	Se utiliza cuando se requieren una resistencia moderada a los sulfatos o un moderado calor de hidratación
Tipo III	Resistencia rápida	Cuando se requiere una alta resistencia inicial, se utiliza este tipo.
Tipo V	Resistencia a sulfatos	Se utiliza cuando el concreto está sometido a el ataque de sulfatos.

En las tablas 2.11 y 2.12 se presentan las características químicas y físicas que deben cumplir estos cementos.

2.2.3 Cemento Pórtland puzolánico.

El cemento Pórtland puzolánico es un cemento hidráulico constituido por una mezcla de cemento Pórtland y puzolana. Estos cementos se emplean cuando no es posible utilizar cementos Pórtland con resistencia al ataque de los sulfatos (Tipo II o V). Existen cuatro tipos de cementos puzolánicos de los cuales solo el tipo IP, de uso general se produce en México.

Estos cementos deben satisfacer la norma ASTM C 595-81 (Standar Especifications for Blendeds Hidraulics Cements) "Especificaciones Estándar para Cementos Hidráulicos mezclados". En las tablas 2.13 y 2.14 se presentan las características físicas y los requisitos de composición que debe de cumplir el cemento puzolánico tipo IP.

2.2.5 Aditivos.

Los aditivos son sustancias químicas o minerales, líquidas o sólidas (en polvo) que se agregan al concreto antes o durante el mezclado, para modificar sus propiedades de acuerdo con los requerimientos o especificaciones de diseño.

2.2.5.1 Aditivos químicos.

Los aditivos químicos que se utilizan en concreto deben satisfacer lo establecido en la norma ASTM C -494-80 (Standar Especifications for Chemical Admixtures for Concrete) "Especificaciones Estándar para Aditivos químicos para Concreto". Los aditivos se han clasificado comúnmente en cinco grupos:

1. Reductor de agua.
2. Retardante de fraguado.
3. Acelerante de fraguado.
4. Reductor de agua y retardante de fraguado.
5. Reductor de agua y acelerante de fraguado.

No. graduación.	De Tamaño nominal (mallas con aberturas cuadradas)	Cantidades más finas que las mallas usadas en el laboratorio (aberturas cuadradas), porcentaje en peso.												
		100 mm (4 pulg)	80 mm (3.15 pulg)	60 mm (2.36 pulg)	42.5 mm (1.67 pulg)	30 mm (1.18 pulg)	25 mm (1 pulg)	19 mm (3/4 pulg)	12.5 mm (1/2 pulg)	9.5 mm (3/8 pulg)	4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 6)	1.18 mm (No. 16)	
1	90 a 38.1 mm (3 1/2 a 1 1/2 pulg)	100	90 a 100	-	25 a 60	-	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	
2	83 a 38.1 mm (2 1/2 a 1 1/2 pulg)	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	
357	50 a 4.75 mm (2 pulg a No. 4)	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	-	0 a 5	-	
487	38.1 a 4.75 mm (1 1/2 a No. 4)	-	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	0 a 5	-	
57	25.0 a 4.75 mm (1 pulg a No. 4)	-	-	-	-	-	100	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5	
67	19.0 a 4.75 mm (3/4 pulg a No. 4)	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	-	20 a 55	0 a 10	0 a 5	
7	12.5 a 4.75 mm (1/4 pulg a No. 4)	-	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	
8	9.5 a 2.36 mm (3/8 pulg a No. 6)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5
3	50.0 a 25.0 mm (2 a 1 pulg)	-	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	
4	38.1 a 9.0 mm (1 1/2 a 3/4 pulg)	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	-	0 a 5	-	-	

TABLA 2.10 Requisitos granulométricos para agregados gruesos.

Fuente: ASTM C 150-81

Tipo de cemento	I y I A	II y II A	III y III A	IV	V
Dióxido de Silíce (SiO ₂), mín, %	-	21.0	-	-	-
Oxido de Aluminio (Al ₂ O ₂), máx, %	-	6.0	-	-	-
Oxido de Hierro (Fe ₂ O ₃), máx, %	-	6.0	-	6.5	-
Oxido de Magnesio (MgO), máx, %	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Trióxido de Azufre (SO ₃) ^A , máx, %					
Cuando (C ₃ A) ^B es 8% o menos	3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
Cuando (C ₃ A) ^B es más de 8%	3.5	c	4.5	c	c
Pérdida por ignición, máx, %	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0
Residuo insoluble, máx, %	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Silicato tricálcico (C ₃ S) ^B , máx, %	-	-	-	35.0	-
Silicato dicálcico (C ₂ S) ^B , mín, %	-	-	-	40.0	-
Aluminato tricálcico (C ₃ A) ^B , máx, %	-	8	15	7	5
Ferroaluminato tetracálcico más el doble del aluminato tricálcico ^B (C ₄ AF + 2(C ₃ A)), o solución sólida (C ₄ AF + C ₂ F), lo que sea aplicable, máx, %	-	-	-	-	20 ^D

A Hay casos donde el SO₃ óptimo para un cemento en particular excede el límite en esta especificación. Cuando se demuestre mediante el método C563 que dicha condición existe, es aceptable una cantidad adicional de SO₃ en ningún caso mayor de 0.5% en peso del cemento, siempre que, cuando el cemento con el sulfato de calcio adicional, se pruebe con el método C265, el sulfato de calcio en el mortero hidratado a 24± 1/4 hora expresado como SO₃, no exceda 0.50 g/litro. Cuando el fabricante-suministra el cemento bajo esta previsión, él deberá, al requerirsele, suministrar datos de apoyo al comprador.

B La presentación expresa de las limitaciones químicas mediante compuestos calculados supuestos, no significa necesariamente que los óxidos están real o enteramente presentes como tales compuestos. Al expresar compuestos C=CaO, S=SiO₂ A=Al₂O₃ F=Fe₂O₃. Por ejemplo, C₃A=3CaO.Al₂O₃.

Quando la relación de porcentajes del oxido de aluminio al óxido de hierro es de 0.64 o mayor los porcentajes del silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico, y ferroaluminato tetracálcico deben calcularse del análisis químico como sigue: Cilicato tricálcico = (4.071 x %CaO) - (7.600 x %Ci01)

Silicato dicálcico = (6.718 x %A1203) - (1.430 x %Fe20) - (2.852 x %C03)
(2.867 x %SiOZ) - (0.7544 x %C3S)

Aluminato tricálcico = (2.650 x %A1203) - (1.692 x %Fe203)

Ferroaluminato tetracálcico = 3.043 x %Fe203

Quando la relación alúmina-óxido de hierro es menor de 0.64 se forma una solución sólida de ferroaluminato de calcio (expresada como ss(C₄AF + C₂F)). Los contenidos de esta solución sólida y del silicato triálcico deben calcularse mediante las fórmulas siguientes: ss(C₄AF + C₂F) = (2.100 x %Al₂O₃) + (1.702 x %Fe₂O₃); Cilicato tricálcico = (4.071 x %CaO) - (7.600 x %SiO₂) - (4.479 x %Al₂O₃) - (2.859 x %Fe₂O₃) - (2.852 x %SO₃).

No habrá aluminato tricálcico presente en cementos de esta composición. El silicato dicálcico deberá calcularse como se mostró anteriormente.

En el cálculo de C₃A, deben usarse los valores del Al₂O₃ Y Fe₂O₃ determinados al 0.01% de precisión. En el cálculo de otros compuestos, los óxidos deben usarse al 0.1% de precisión. Todos los valores calculados descritos en esta nota deben reportarse al 1% de precisión.

C No aplicable

D No se aplica cuando se especifica el límite de expansión por sulfato.

TABLA 2.11 Requisitos químicos estándar para cemento Pórtland.

Tomado de: ASTM C150 - 81

Tipo de cemento	I	IA	II	IIA	III	IIIA	IV	V
Contenido de aire del mortero, ^A % en volumen:								
máx	12	22	12	12	12	22	12	12
mín	-	16	-	16	-	16	-	-
Finura, ^B superficie específica, m ² /kg (métodos alternativos):								
Prueba del turbidímetro, mín	160	160	160	160	-	-	160	160
Prueba de permeabilidad al aire, mín	280	280	280	280	-	-	280	280
Expansión en autoclave, máx, %	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
Resistencia, no menor que los valores mostrados para las edades que se indican más abaj ^C :								
Resistencia a la compresión MPa (psi)								
1 día	-	-	-	-	12.4 (1800)	10.0 (1450)	-	-
3 días	12.4 (1800)	10.0 (1450)	10.3 (1500) 6.9 ^E (1000) ^E	8.3 (1200) 5.5 ^E (800) ^E	24.1 (3500)	19.3 (2800)	-	8.3 (1200)
7 días	19.3 (2800)	15.5 (2250)	17.2 (2500) 11.7 (1700)	13.8 (2000) 9.3 (1350)	-	-	6.9 (1000)	15.2 (2200)
28 días	-	-	-	-	-	-	17.2 (2500)	20.7 (3000)
Tiempo de fraguado (métodos alternativos): ^D								
Prueba Gilmore:								
Fraguado inicial, minutos, no menos de:	60	60	60	60	60	60	60	60
Fraguado final, horas, no más de:	10	10	10	10	10	10	10	10
Prueba de Vicat:								
Fraguado inicial, minutos, no menos de:	45	45	45	45	45	45	45	45
Fraguado final, horas, no más de:	8	8	8	8	8	8	8	8
<p>^A El cumplir con los requisitos de esta especificación no asegura necesariamente que se alcanzará el contenido de aire deseado para el concreto.</p> <p>^B Cualquiera de los dos métodos alternativos para finura pueden ser usados según la opción del laboratorio de ensayos. Sin embargo cuando la muestra no cumple con los requisitos de la prueba de permeabilidad al aire, debe usarse la prueba del turbidímetro gobernando así los requisitos de esta tabla para el método del turbidímetro.</p> <p>^C La resistencia a una determinada edad especificada no debe ser menor que la obtenida en cualquier grupo de ensayos especificado previamente.</p> <p>^D El comprador debe especificar el tipo de ensaye para tiempo de fraguado. Si no lo especifica, gobernará solamente la prueba de Vicat.</p> <p>^E Cuando se especifica el calor opcional de hidratación o el límite químico sobre la suma del silicato tricálcico y el aluminato tricálcico.</p>								

TABLA 2.12 Requisitos físicos para el cemento Pórtland.

Tomado de ASTM C 595 - 81

Tipo de cemento	I P
Ingredientes mezclados, % límites	15 a 40
Oxido de Magnesio (MgO), máx, %	5.0
Trióxido de azufre (SO ₃), máx, %	4.0
Azufre en sulfatos (S), máx, %	-
Residuos insolubles, máx, %	-
Pérdida por ignición, máx, %	5.0
Alcalis solubles en agua, máx, %	-

TABLA 2.13 Requisitos de composición para cementos puzolánicos.

Tomado de: ASTM C 595 - 81

Tipo de Cemento	IP
Finura:	A
Expansión o contracción en autoclave, máx, % ^a	0.50
Tiempo de fraguado, prueba de Vicat:	
Fraguado inicial, minutos, no menos de	45
Fraguado final, horas, no más de	7
Contenido de aire en el mortero (método C 185) % en volumen	12 máx
Resistencia a la compresión MPa (psi):	
Resistencia, no menor que los valores mostrados para las edades que se indican más abajo:	
3 días	12.4 (1800)
7 días	19.3 (2800)
28 días	24.1 (3500)
Calor por hidratación: ^c	
7 días, máx, cal/g (kJ/kg)	70 (293)
28 días, máx, cal/g (kJ/kg)	80 (335)

^a Tanto el retenido por vía húmeda sobre la malla No. 325 (45 µm) como la superficie específica mediante el aparato para permeabilidad al aire, cm²/g, deben reportarse en todos los registros de molido que se requieran.

^b Los especímenes deben permanecer firmes y duros sin mostrar signos de distorsión, fracturamiento, ablandamiento o desintegración, cuando se sujetan a pruebas de expansión en autoclave.

^c Solamente aplicable cuando se especifica calor de hidratación moderado (C M) o bajo (C B), en cuyo caso los requisitos de resistencia de berán ser del 80% de los valores que se muestran en la tabla.

TABLA 2.14 Requisitos físicos para cementos puzolánicos.

En la tabla 2.15 se establecen los principales requisitos físicos que debe satisfacer el concreto cuando se usan aditivos para modificar sus propiedades, así como los ensayos y especímenes necesarios para verificar sus propiedades afectadas por el uso de un aditivo.

2.2.5.1 Includor de aire.

Este tipo de aditivo se utiliza cuando las condiciones climáticas a que esté sometido el concreto sean severas y se prevea que los aditivos puedan reaccionar con los álcalis del cemento, los porcentajes que deben agregarse dependen de el tamaño del agregado que se utilice en el concreto (ver norma ACI 212.2R-71). El aditivo se incorpora a la mezcla por medio del agua de mezclado. Debe satisfacer los requerimientos de la norma ASTM C 269-77 (Standar Especifications for Air Entrainimg Admixtures for Concrete) " Especificaciones Estándar para Aditivos Includores de aire para Concreto".

2.2.5.3 Membrana de curado.

La membrana de curado no puede considerarse como aditivo químico ya que no se adiciona a la mezcla, pero si es un compuesto químico a considerar, esta membrana es un líquido que se aplica a la superficie terminada del concreto con el objeto de curarlo. Se utiliza en lugar del agua, Debe satisfacer lo establecido en la norma ASTN C 309-81 Standar Especifications for Liquid Membrane Forming Compound for Curing Concrete) " Especificaciones Estándar para Compuestos Líquidos que forman Membranas para el Curado de Concreto".

2.2.5.4 Aditivos minerales.

Son aditivos que se presentan pulverizados, con una finura mayor a la del cemento, sirven para mejorar las características físicas del concreto fresco, se utilizan cuando los agregados presentan deficiencias granulométricas. Se clasifican entres grupos:

1. Los químicamente inertes.
2. Los puzolánicos.

Los cementantes

En el primer grupo se encuentran la bentonita, la cal hidratada, el talco, los suelos cuarzosos y los suelos calizos.

Los puzolánicos son materiales silíceos o silico-alumínicos, que poseen poco o nulo valor cementante, pero que al ser finamente pulverizados y en presencia de humedad reaccionan, formando un compuesto con propiedades cementantes. Entre esto se encuentran las cenizas y vidrio volcánico, las tierras diatomáceas y algunas lutitas.

Los cementantes son los cementos naturales, las cales hidráulicas, los cementos de escoria, (mezclas de escorias de fundición con cal) y escorias de fundición de hierro granulado

Deben cumplir con lo estipulado en la norma ASTM C 618-80 (Standar Especifications for Fly ash and Raw or Calcinated Natural Puzzolan for use as a Mineral Admixture in Pórtland Cement Concrete) " Especificaciones Estándar para Cenizas Finas y Puzolanas Naturales, en Greña o Calcinadas para usarse como Aditivos minerales en Concretos de cemento Pórtland. En la tabla 2.14 se muestran los requisitos físicos y químicos que deben satisfacer estos aditivos minerales.

Fuente: ASTM C 494-80					
	Tipo A Reductor de agua	Tipo B Retardante	Tipo C Acelerante	Tipo D Reductor de agua y re- tardante	Tipo E Reductor de agua y ace- lerante
Contenido de agua, máximo, % del control:	95	-	-	95	95
Tiempo de fraguado, desviación permisible del control, h : min :		más	más	más	más
Inicial: por lo menos	-	1:00 tarde	1:00 temprano	1:00 tarde	1:00 temprano
no más de	más 1:00 temprano pero no más - de 1:30 tarde	más 3:30 tarde	más 3:30 temprano	más 3:30 tarde	más 3:30 temprano
Final: por lo menos	-	-	más 1:00 temprano	-	más 1:00 temprano
no más de	más 1:00 temprano pero no más - de 1:30 tarde	más 3:30 tarde	-	más 3:30 tarde	-
Resistencia a la compresión, mínimo, % del control: ^B					
3 días	110	90	125	110	125
7 días	110	90	100	110	110
28 días	110	90	100	110	110
6 meses	100	90	90	100	100
1 año	100	90	90	100	100
Resistencia a la flexión, mínimo, % del control:					
3 días	100	90	110	100	110
7 días	100	90	100	100	100
28 días	100	90	90	100	100
Cambio en longitud, contracción máxima (requisitos alternativos): ^C					
Porcentaje del control	135	135	135	135	135
Incremento sobre el control	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
Factor de durabilidad relativa, mínimo ^D	80	80	80	80	90

A Los valores en la tabla incluyen tolerancias para variaciones normales en los resultados de las pruebas. El objetivo del requisito al 90% de la resistencia a la compresión para el aditivo tipo 3 es para alcanzar un nivel de comportamiento comparable al del concreto de referencia.

B La resistencia a la compresión y a la flexión del concreto que contiene el aditivo bajo prueba en cualquier edad, no debe ser menor del 90% de la obtenida en cualquier prueba previa. El objetivo de este límite es establecer que la resistencia a la compresión o a la flexión del concreto que contiene el aditivo bajo prueba, no decrezca con la edad.

C Para requisitos alternativos, ver sección 17.1.4 de la Norma ASTM C 494-80, el porcentaje límite del control se aplica cuando el cambio de longitud del control sea 0.030% o mayor, el límite incremento sobre el control se aplica cuando el cambio de longitud del control es menor de 0.030%.

D Este requisito se aplica solamente cuando el aditivo se usara en un concreto con aire incluido, el cual puede estar expuesto a congelación y deshielo mientras está húmedo.

TABLA 2.15 Requisitos físicos ^A del concreto, cuando se usan aditivos.

2.3 Lodos de Perforación.

Los lodos de perforación son utilizados para dar estabilidad a las paredes de perforaciones previa para los pilotes, o para contener el empuje hidrostático que causa el agua al pasar a través de las paredes de la misma.

En forma general están formados por agua y arcilla bentonítica sódica o cálcica. El agua debe contener menos del 1% de cloruro de sodio y menos de 120 ppm de sales de calcio en suspensión.

Deben determinarse las propiedades físicas del lodo bentonítico, para calificar su calidad. Entre estas características a determinarse se encuentran las siguientes:

- a) **Densidad.**- También llamada peso específico, se conoce mediante el uso de una balanza de lodos.
- b) **Viscosidad de Marsh.**- Es el tiempo en segundos que transcurre durante el escurrimiento de 946 cm^3 de lodo, a través de un orificio calibrado ubicado en el extremo inferior de un cono Marsh. El lodo bentonítico tarda entre 35 y 60 segundos, se prefieren los valores bajos del tiempo, ya que representan una mayor manejabilidad.
- c) **Viscosidad plástica.**- Esta se determina con un viscosímetro rotacional capaz de hacer girar un cilindro externo a 3, 5, 100, 200, 300 y 600 rpm, debido a la viscosidad del lodo se hace girar a otro cilindro interno. Usualmente esta viscosidad varía entre 10 y 25 centipoises, valores mayores a estos dificultan el manejo del lodo y valores por debajo de este intervalo no garantizan un funcionamiento adecuado del lodo.
- d) **Rendimiento.**- Se conoce como rendimiento de una bentonita a la cantidad de lodo bentonítico con una viscosidad de 15 centipoises en m^3 que se puede elaborar con una tonelada de bentonita seca.
- e) **Filtración.**- Esta característica permite determinar la capacidad que tiene un lodo para formar una película impermeable en las paredes de las perforaciones. Para realizar esta prueba se utiliza un filtro prensa, capaz de recibir una presión de 7 kg/cm^2 y recoger en la parte inferior el agua filtrada expulsada a través de un papel filtro y un orificio después de 30 minutos. Al final se mide el agua filtrada en cm^3 y el espesor de la película que queda pegada en el papel filtro. Un buen lodo debe de tener 20 cm^3 de agua filtrada y una costra no mayor de 0.5 cm.
- f) **Contenido de arena.**- Este factor influye drásticamente en las operaciones de perforación, provocando daños en el equipo, en la herramienta y en tuberías. Un mayor contenido de arena incrementa el agua de filtrada y el espesor de la costra. Este factor se determina pasando una cantidad de lodo por una malla N° 200 y la arena retenida se expresa en porcentaje, este debe ser menor al 3%.

2.3.1 Dosificación.

Con agua dulce se acostumbra emplear porcentajes de bentonita en peso de 5 a 10% en relación al agua. Los sistemas de mezclado están integrados por una o varias bombas que permiten recircular el lodo. Existen mezcladores de chiflón, estos son empleados cuando se requieren volúmenes pequeños. Es común emplear entre 3 y 10 minutos de mezclado para lograr una buena hidratación inicial.

CAPITULO III.

MAQUINARIA Y EQUIPO.

CAPÍTULO III. MAQUINARIA Y EQUIPO.

El presente capítulo trata sobre el equipo que se utiliza en el hincado y manejo de los pilotes prefabricados de concreto y los de acero, así como de la descripción del equipo necesario para realizar perforaciones previas, ya sea para el hincado de pilotes con poco desplazamiento o para la fabricación de pilotes colados en el sitio. Debido a que la tecnología tiene un avance cada vez más acelerado, la vigencia de los equipos descritos es muy corta, por esta razón se ha optado por describir lo equipos en forma generalizada y se ha tratado de involucrar tipos y modelos lo menos posible.

La selección y utilización del equipo y maquinaria adecuada a cada una de las etapas del proceso constructivo es de gran importancia, debido a que el no contar con la opción óptima para el caso particular de que se trate, se perjudicará la calidad y se elevará el costo del producto final.

3.1 EQUIPO PARA HINCADO DE PILOTES.

Como ya se mencionó en el apartado 1.3 del Capítulo I, existen tres formas de hincar los pilotes:

- A percusión.
- A presión.
- Con vibración.

Partiendo de esto, se mencionará el equipo necesario para cada caso.

3.1.1 Equipo para hincado a percusión.

El hincado de pilotes mediante la percusión es realizado por medio de martillos o martinetes, la función de un martinete es la de proporcionar la energía que se requiere para el hincado de pilote, la energía es producida por medio de la generación de impactos en serie. Se utilizan también para el hincado de tablaestacas y tubos, entre otros. Los martinetes para el hincado de pilotes se designan por tipo y tamaño.

Conceptualmente los martillos piloteadores fueron masas de caída libre que se colocaban nuevamente en posición previa al descenso mediante sistema manuales o mecánicos. Con el desarrollo de la tecnología se utilizó vapor de agua o aire comprimido para levantar la masa que cae; posteriormente se logró que se acelerara la caída de la masa durante su descenso, logrando una mayor energía en el impacto.

Los tipos existentes de martillos son los siguientes:

1. De caída.
2. De vapor, simple acción.
3. De vapor, doble acción.
4. De vapor, acción diferencial.
5. Diesel.

Los martillos de combustión interna, que utilizan el diesel como energético para obtener la energía utilizada para levantar la masa golpeadora, en los que también la explosión es utilizada para aumentar el impacto del hincado, son actualmente el tipo más comúnmente utilizado, debido a que son de fácil operación y existe en el mercado gran variedad de modelos y capacidades. La unidad completa del martinete consiste en un cilindro vertical, un pistón o ariete, un yunque, tanques de combustible y aceite lubricante, bomba de combustible. Inyectores y un lubricador mecánico. En la *figura 3.1* se muestra en forma esquemática los componentes principales de un martillo diesel.

Un martillo diesel es una unidad de hincado, que se contiene en sí misma y que no requiere una caldera de vapor o un compresor de aire. Los martillos diesel son de dos tipos, de extremo abierto y de extremo cerrado. En los martillos de extremo abierto, el martillo cae por gravedad y aplica energía al yunque por impacto directo. Sin embargo, al descender se inyecta combustible en la cámara de combustión. En el instante del impacto, el combustible se enciende y nuevamente levanta el martillo, durante un tiempo significativo, la presión de los gases actúa sobre el yunque y aumenta la magnitud y duración de la fuerza impulsora.

En los martinets de extremo cerrado, la cubierta se extiende sobre el cilindro para formar una cámara de rebote, en la que se comprime el aire al subir el martillo. El aire comprimido funciona como muelle, limitando la carrera del martillo. Al disminuir la carrera aumenta el número de golpes por minuto. En la *figura 3.2* se muestra en forma esquemática un martillo de vapor de acción simple y martillos diesel, abierto y cerrado.

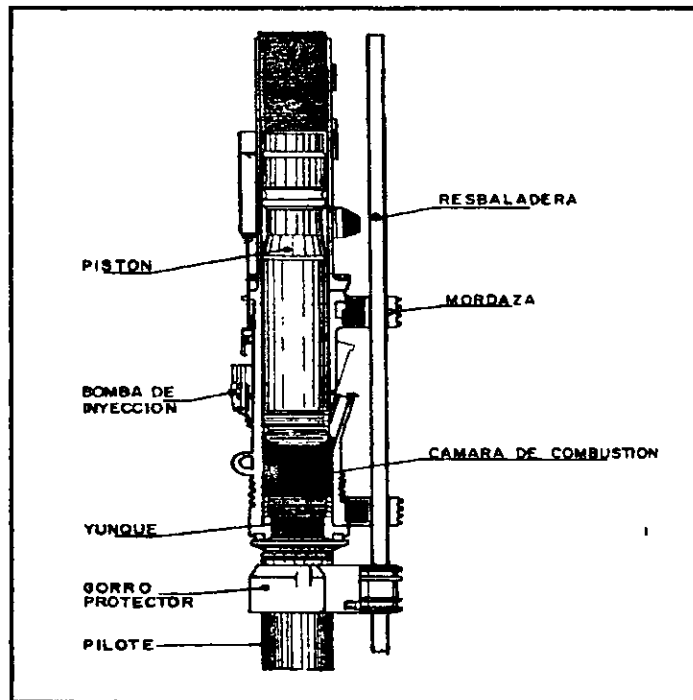


FIGURA 3.1 partes principales de Martillo diesel.

El ciclo de operación de los martillos diesel se inicia con la caída libre de un pistón guiado dentro de un cilindro que al comprimir el aire en el interior de la cámara de combustión produce el encendido y explosión súbita del diesel, previamente inyectado. La explosión y el impacto de la masa que golpea provocan la penetración del pilote en el terreno y la expansión de los gases quemados impulsa al pistón hacia arriba y así, en forma repetida.

Para un hincado eficiente de los pilotes deben seleccionarse martillos con energía y peso adecuados con las dimensiones, pesos y capacidad de carga esperada. Por lo general se busca que el peso del pistón móvil no sea menor que 0.3 a 0.5 del peso del pilote.

Si el peso del pistón es menor al valor recomendado, se corre el riesgo de que el pilote no alcance la capacidad de carga esperada y que se dañe la cabeza del pilote por el gran número de golpes recibidos al hincarlo. Si por el contrario el pistón es demasiado pesado para el tamaño del pilote usado, este último puede dañarse en su longitud.

a) Resbaladeras.

Son estructuras que se integran a las plumas de las grúas, sirven para que deslice por ellas tanto el martillo piloteador, como el dispositivo de disparo; pueden ser fijas, oscilantes o suspendidas. En la figura 3.3, se muestran los tres tipos de resbaladeras.

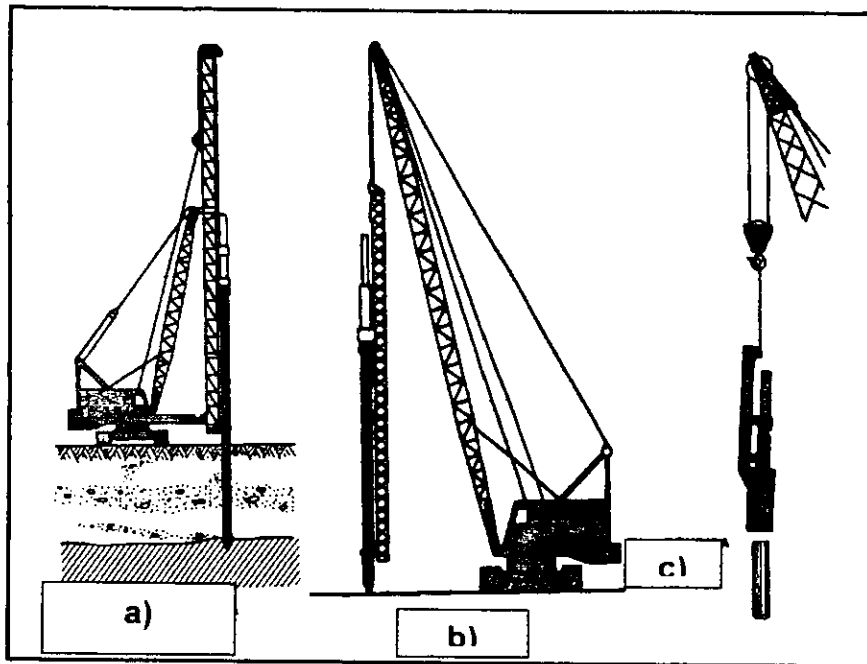


FIGURA 3.3 Tipos de resbaladeras.

- a) Fija.
- b) Oscilante.
- c) Suspendida por cable.

b) Gorros de protección.

Se utilizan para proteger la cabeza del pilote, estos dispositivos amortiguan y distribuyen la energía de los impactos del martillo sobre la cabeza. En realidad los pilotes fuertemente armados, con un zunchado en espiral son tan resistentes, que podría dejarse caer la maza directamente en la cabeza del pilote; Sin embargo si no se usa el gorro se corre el riesgo de que se dañe la maza del martillo, si en la cabeza del pilote el concreto se desmenuza por un lado y la masa golpea excéntricamente.

Los gorros están integrados por una estructura monolítica de acero en forma de caja. En la parte superior se coloca una "sufridera", que puede ser de madera, material plástico, o trozos de cable de acero y sobre ella va una placa metálica. En la caja inferior, que es la parte de contacto entre martillo y pilote, va colocado un colchón de madera. En la figura 3.4, se muestra algunos arreglos de gorros de protección.

Las funciones de la sufridera son:

- > Absorber la fuerza del impacto en pilotes frágiles.
- > Proteger los pilotes en terrenos duros.
- > Distribuir y transmitir uniformemente las fuerzas generadas por el martillo hacia el gorro y los pilotes.
- > Alargar la vida útil del gorro.

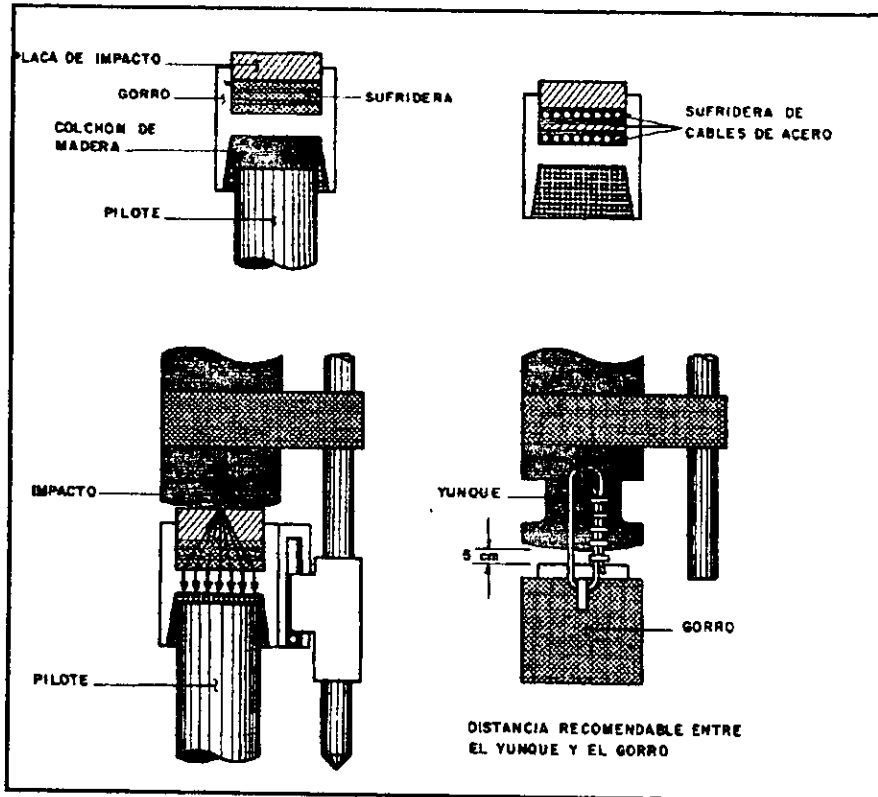


FIGURA 3.4 Arreglos en gorros de protección.

3.2 HINCADO DE PILOTES CON VIBRACIÓN.

Para este procedimiento se utiliza un martillo vibrador o vibrohincador, a continuación se describe las principales características de este equipo:

3.2.1 Vibrohincadores.

Los vibrohincadores son máquinas diseñadas para llevar a cabo el hincado o extracción de tubos o perfiles de acero en el subsuelo, por medio de la acción dinámica de un generador de vibraciones y el peso propio del equipo, cuando se realiza hincado y la capacidad de levante de una grúa, si se realiza una extracción. Los generadores consisten de un peso estático y un par de pesos excéntricos, que giran en sentido contrario y están dispuestos de forma que las componentes horizontales de la fuerza centrífuga se anulen entre sí y las verticales se sumen (ver figura 3.6.)

La parte vibratoria de la máquina se une positivamente a la cabeza del pilote y el resto de la máquina se aísla del vibrador por medio de muelles, de manera que no participe de los movimientos vibratorios.

La energía del vibrohincador es tomada de un motor de combustión interna generalmente diesel, que acciona un generador eléctrico o una bomba hidráulica, el primero se utiliza si el generador de vibraciones, a base de contrapesos excéntricos de rotación contraria, opera con motores eléctricos y el segundo si opera con motores hidráulicos.

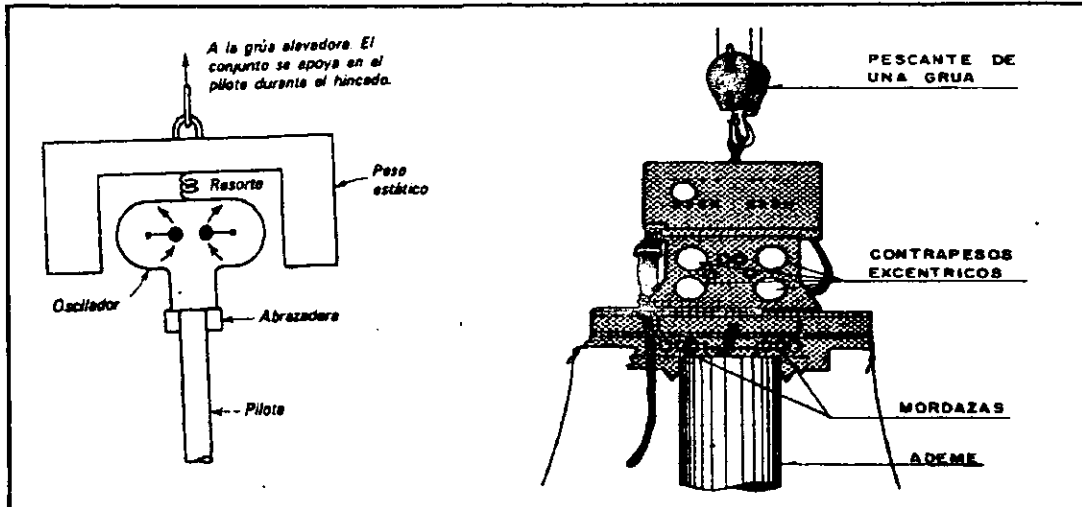


FIGURA 3.5 Croquis de Vibrohincador.

Con un sistema de control remoto se arranca o para el generador de vibraciones y se accionan mordazas hidráulicas para sujetar los tubos o perfiles durante su hincado.

Para trabajar el vibrohincador se cuelga de una grúa móvil con pluma y capacidad adecuada a las cargas que se van a mover.

Puede utilizarse en la construcción de pilotes colados in situ, para hincar o extraer el tubo de ademe, en caso de que sea recuperable.

En la tabla 3.2 aparecen modelos, marcas y características de vibrohincadores.

MARCA	MODELO	PESO Kg	MOMENTO EXCÉNTRICO Kg-cm	FRECUENCIA MÁXIMA rpm
ICE	116	1542	7.0	1600
ICE	216	2050	11.5	1600
ICE	416	5400	20.7	1600
ICE	815	6670	46.1	1500
ICE	1412	11800	115.2	1250
TOMEN VIBRO	VM2-40 A	3522	-	1300
TOMEN VIBRO	VM2-500	5100	-	1800
TOMEN VIBRO	VM4-10 000	8450	-	1100
TOMEN VIBRO	VM 250000A	7590	200	620
MULLER	MS -5 HV	800	5.8	1762
MULLER	MS -20 H	2700	20.0	1762
MULLER	MS -50 H	6500	50.0	1653
MULLER	MS -60 E	7200	71.0	1500
MULLER	MS -60 E TWIN	20 000	142.0	1500
PTC	10 A2	2.350	-	1140
PTC	20 A2	3700	-	1100
PTC	20H4	4500	-	1450
PTC	40 A2	7400	-	1045
PTC	40HA	10500	-	1450

TABLA 3.2 Características de martillos vibrohincadores.

3.3 SELECCIÓN DEL EQUIPO DE HINCA.

El equipo de hinca por percusión según Crespo debe tomar en cuenta los siguientes factores:

- Peso del pilote.
- Capacidad de carga probable.
- Forma de impulsión del martillo.

Rabe ha propuesto la siguiente expresión para determinar el peso del martinete y su altura de caída o energía.

$$F = W * H = \frac{N * C * R}{B \left[1 - J * \frac{\frac{P}{2}}{W + \frac{P}{2}} \right]} \quad \text{Ec. 3.1}$$

DONDE:

- W = Peso de las partes del martinete que intervienen en el golpe.
- H = Altura de caída de peso W en pies.
- R = Capacidad de carga permisible para el pilote en libras, con un factor de seguridad aproximado de 2.
- C = Pérdida temporal de compresión en pulgadas.
- P = Peso del pilote incluyendo el cabezal de hinca, en libras.
- B = $B_s * B_l * B_c$ es un factor de corrección que incluye el tipo de suelo, la longitud del pilote y su sección transversal, respectivamente.

Los factores de N y J deben tomarse de la tabla 3.3. Cualquier combinación de peso de martinete W y altura de caída H que dé un valor de F comprendido entre los valores máximo y mínimo obtenidos con la ecuación 3.1 es adecuado para el hincado. Es aconsejable que la altura de caída del martinete no sea mayor de dos metros.

Tipo de Martinete.	M	U	C	Mínimo		Máximo	
				N	J	N	J
Caída movida por cable.	4	0.2	0.25	0.3	1.4	0.80	2.2
Caída libre.	4.7	0.2	0.25	0.3	1.4	0.80	2.2
De vapor de acción simple o de aire.	5.0	0.1	0.15	0.18	1.2	0.45	1.8
De vapor, aire o de vapor diferencial.	5.2	0.05	0.15	0.16	1.2	0.40	1.8
De vapor, de aire, de doble acción o diesel.	6.0	0.05	0.15	0.16	1.2	0.40	1.8

TABLA 3.3 Características para seleccionar el martillo.

El factor de corrección B es el resultado de multiplicar $B_s * B_l * B_c$. El factor de suelo B_s se obtiene de la tabla 3.4. Deben tomarse en cuenta las notas.

El valor del factor de longitud B_l se encuentra en la gráfica a) de la figura 3.6. El factor B_c de sección transversal del pilote se obtiene de la gráfica b) de la figura 3.6.

Tipo de suelo	B_S
Arcilla plástica o limo muy húmedo, suelo muy pobre.	0.25
Arcilla o limo suave, suelo más bien pobre.	0.50
Arcilla o limo medio, suelo de regular calidad.	0.70
Arcilla o limo duro, arena, grava suelta, buen suelo.	0.85
Limo arenoso denso, arena o grava moderadamente compacta, suelo muy bueno.	1.00
Arena o grava muy compacta, pizarra o tepetate, excelente material de cimentación.	1.25

TABLA 3.4 Factor de tipo de suelo.

Notas

- 1.- Interpólese los valores dados de B_S si es necesario.
- 2.- B_S depende solamente de la clase del suelo penetrado. No se aumente B_S si la punta entra en contacto con roca.
- 3.- Si la arcilla o el limo húmedo tiene buena adherencia, con el pilote puede aumentarse B_S sin que ese aumento exceda el 25% del valor dado.
- 4.- Si hay piedras en el suelo, redúzcase B_S en una cantidad que dependerá de la posibilidad de que el pilote sea detenido por el contacto con las rocas, la reducción no debe exceder del 25% del valor dado en la tabla.
- 5.- Si el pilote penetra a través de diferentes clases de suelos, como ocurre frecuentemente, estímesese un valor medio pesado de B_S para toda la longitud de penetración, dando un peso considerablemente mayor para el suelo cerca de la punta que para el de arriba.

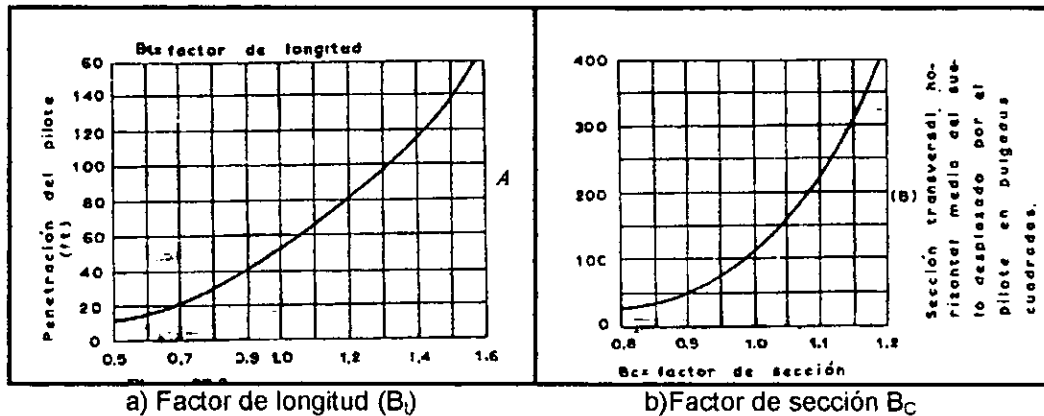


FIGURA 3.6 Factores de Corrección.

3.4 EQUIPO PARA MANEJO DE PILOTES.

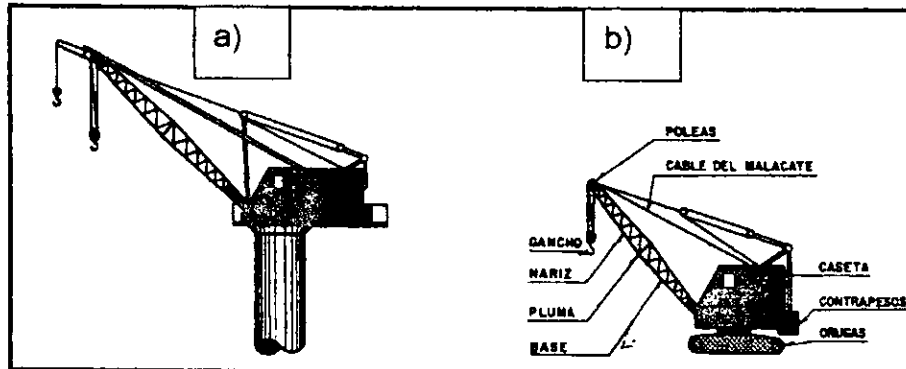
El manejo de pilotes se hace necesario cuando se utilizan pilotes prefabricados de concreto o pilotes de acero (tubos y secciones H) que se deben de mover del sitio de fabricación o almacenaje al sitio de hincado. A continuación se describirán algunos de los equipos utilizados en el manejo de los pilotes.

3.4.1 Grúas.

Las grúas son máquinas que sirven para el levantamiento y manejo de objetos pesados, cuentan para ello con un sistema de malacates que accionan a uno o varios cables montados sobre una pluma y cuyos extremos terminan en gancho.

La unidad motriz, y los diferentes mecanismos de la máquina están dispuestos de forma tal, que pueden girar alrededor de un eje vertical y la pluma puede moverse en un plano horizontal. Esto hace más fácil su operación.

Dentro de éstas se puede encontrar a las grúas de tipo fija y a las móviles. La grúa de tipo móvil pueden desplazarse por si misma, utilizando para ello orugas o neumáticos. En la figura 3.7 se muestran los tipos de grúas.



a) grúa fija b) grúa móvil sobre orugas
FIGURA 3.7 Tipos de grúas.

Existen distintos tipos de plumas, estas pueden ser rígidas, cuando están formadas por estructuras modulares (tubo o ángulo estructural), y telescópicas cuando están formadas por elementos prismáticos que deslizan unos a través de los otros. Las grúas móviles con pluma telescópica son denominadas comúnmente "patos". En la figura 3.8 se muestra un esquema del tipo anterior.

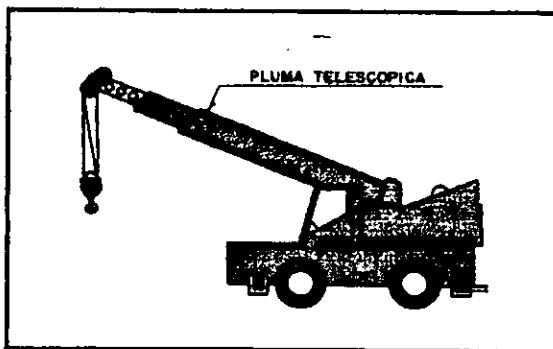


FIGURA 3.8 Grúa móvil de pluma telescópica (Pato)

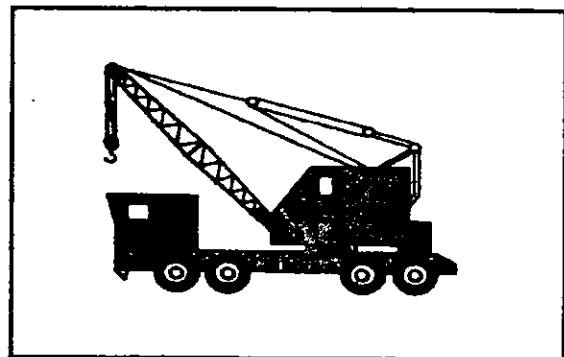


FIGURA 3.9 Motogrúa.

Las plumas rígidas son integradas por una base que se apoya por medio de una articulación en cuerpo de la grúa; después pueden colocarse módulos de 1.5 m (5 pies) a 6.1 m (20 pies) de largo y finalmente una nariz en cuyo extremo superior se ubican las poleas por donde pasan los cables procedentes de los tambores de los malacates.

Para la construcción de pilotes colados in situ se utilizan generalmente grúas móviles de pluma rígida, ya sea que se usen para montar equipos de perforación o para ejecutar maniobras de manejo y colocación de armados, tubería de colado, etc. Para este tipo de pilotes no se aconseja el uso de patos, debido a su poca eficiencia en el manejo de armados y tuberías de colado.

En el hincado de pilotes se utilizan para colocar sobre sus plumas los martillos que dan la energía para el hincado del pilote.

Para el montaje de equipos de perforación, usualmente se requieren grúas de 45 a 80 toneladas de capacidad nominal, con plumas rígidas de 18.3 m (60 pies) de largo.

Las grúas utilizadas para realizar maniobras son de menor capacidad nominal, aunque nunca debe ser menor de 15 toneladas. Las condiciones del terreno determinarán si son montadas sobre orugas o neumáticos. En la *tabla 3.4* se muestra algunas características de grúas usadas en México.

a) PARA MONTAR PERFORADORAS			
Marca	Modelo	Capacidad Ton.	Peso Ton
Link Belt	LS 108-B	45.0	38.4
Bucyrus Erie	61 B	66.5	67.3
Link Belt	LS 118	60.0	54.7
P & H	670 WCL	70.0	-
Link Belt	LS 318	80.0	63.3
b) PARA EFECTUAR MANIOBRAS.			
Link Belt	LS 68	15.0	17.7
Bucyrus Erie	22 B	12.0	19.3
Link Belt	LS 78	17.5	21.7
Link Belt	LS 98	27.0	27.7

TABLA 3.4 Grúas de uso frecuente en México.

En la *tabla 3.5* se muestran las especificaciones de algunos modelos de grúas hidráulicas montadas sobre camión, que son distribuidas en nuestro país por Mextrac.

Las grúas hidráulicas sobre camión son especiales para carretera, reducen los tiempos de desplazamiento entre trabajos. Cuentan con plumas de largo alcance y gran capacidad, lo que simplifica su instalación en obra.

3.5 EQUIPO PARA REALIZAR PERFORACIONES PREVIAS.

3.5.1 Perforadoras.

Son máquinas para hacer barrenos en el subsuelo, por medio de una barra en cuyo extremo inferior se coloca una herramienta que puede ser una broca, un bote cortador, un trépano, etc.

La barra se hace girar en mecanismos o se levanta y se deja caer rítmicamente sobre el fondo de la perforación. Su funcionamiento da lugar a que se clasifiquen como rotatorias o de percusión.

Las perforadoras de percusión, a través de un sistema, que puede ser mecánico, neumático o hidráulico, transmiten una serie de impactos al material a perforar, por medio de un elemento de corte o ataque. Su aplicación principal es en rocas, debido a que en suelo su eficiencia es menor.

Para pequeños diámetros, se utilizan máquinas que por efecto de la percusión continua, transmitida a través de una serie de barras, forman la perforación; existen herramientas más eficientes, conocidas como martillos neumáticos, que presentan la ventaja de producir la percusión directamente en el fondo de la perforación. Con estos equipos es posible lograr barrenos del orden de 35 cm de diámetro.

Las perforadoras de tipo rotatorio se emplean en la perforación de barreno, con o sin obtención de núcleos, en la investigación geológica, minera, de mecánica de suelos, en perforaciones de

grandes diámetros con fines de construcción de cimentaciones y en perforaciones de pozos de agua y perforaciones petroleras.



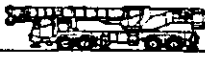

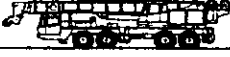
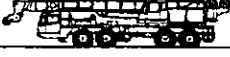


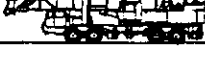
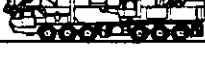
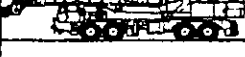

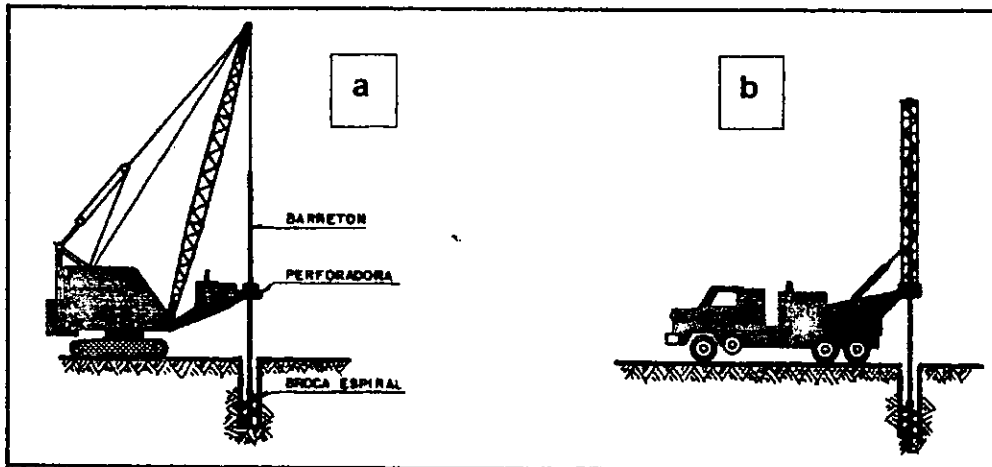
ESPECIFICACIONES GRUAS SOBRE CAMION									
	MODELO	Capacidad Elevacion	Longitud Pluma Standard	Altura Maxima En Punta	Numero De Motores	Motor Camion	Motor Grua	Numero De Ejes	Peso Bruto
	TMS635BE	30 Tm	32,0 m	47,6 m	1	157 Kw	—	3	26296 kg
	TMS250C	30 Tm	24,4 m	41,8 m	1	157 Kw	—	4	23017 kg
	TMS700B	45 Tm	33,5 m	52,7 m	1	186 Kw	—	4	30207 kg
	TMS760	55 Tm	35,0 m	55,7 m	1	231 Kw	—	4	39468 kg
	TT865BE	60 Tm	38,1 m	57,9 m	2	242 Kw	134 Kw	4	48000 kg
	TT875B	70 Tm	38,1 m	57,9 m	2	242 Kw	134 Kw	4	48000 kg
	TMS800B	75 Tm	38,1 m	57,3 m	1	231 Kw	—	4	46211 kg
	TMB80	72,5 Tm	34,7 m	63,4 m	2	261 Kw	149 Kw	4	49608 kg
	TM890	80 Tm	34,7 m	62,8 m	2	268 Kw	143 Kw	4	54540 kg
	TM8100	90 Tm	34,7 m	62,8 m	2	269 Kw	143 Kw	6	61343 kg
	TM9120	120 Tm	39,6 m	75,6 m	2	343 Kw	186 Kw	4	49669 kg en transport
	TM1500	150 Tm	52,7 m	82,0 m	2	335 Kw	186 Kw	6	87810 kg

TABLA 3.5 Especificaciones de grúas sobre camión.

Las perforadoras de tipo rotatorio se emplean en la perforación de barreno, con o sin obtención de núcleos, en la investigación geológica, minera, de mecánica de suelos, en perforaciones de grandes diámetros con fines de construcción de cimentaciones y en perforaciones de pozos de agua y petroleras.

Estos equipos de perforación basan su operación en la transmisión de un par motriz a una barra (Kelly) en cuyo extremo inferior se encuentra un dispositivo cortador, que penetra en el terreno mediante la rotación.

La selección del equipo de perforación más adecuado para un proyecto dado depende de las propiedades mecánicas que presente el material del lugar, así como el diámetro y profundidad proyectados para los pilotes. En la figura 3.10 se muestran perforadoras sobre grúa y sobre camión



a) Perforadora sobre grúa

b) Perforadora sobre Camión

FIGURA 3.10 Montaje de perforadoras.

3.5.2 Excavadoras de almeja.

Las almejas hidráulicas se utilizan en excavaciones de sección rectangular, oblonga o alguna combinación de estas secciones, este tipo es integrado por dos quijadas móviles que se accionan con cilindros hidráulicos, adosadas en la parte inferior de un barretón o Kelly rígido, de una pieza o telescópico. En la figura 3.11 se muestra un esquema de este tipo de excavadora.

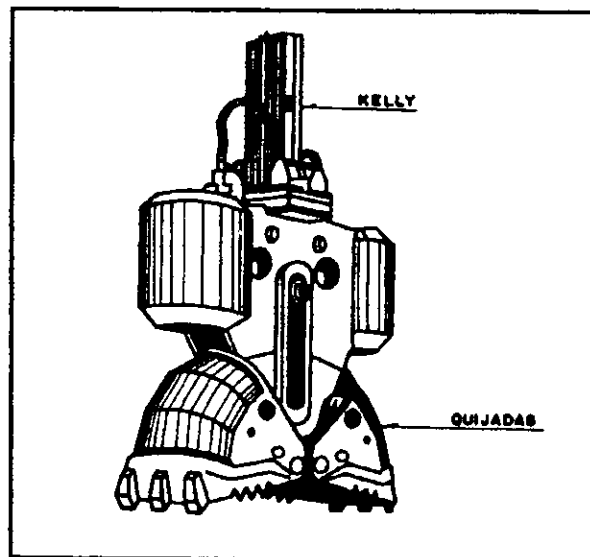


FIGURA 3.11 Perforadora de almeja.

3.5.3 Herramientas de perforación.

Las principales herramientas, que acopladas a los equipos de perforación son:

- Brocas.
- Botes
- Trépanos.

Las perforadoras rotatorias, emplean brocas espirales, botes cortadores, botes ampliadores, y trépanos.

a) Brocas espirales.

Pueden ser cilíndricas o cónicas; están formadas por una hélice colocada al rededor de una barra central, los elementos de corte están constituidos por dientes o cuchillas de acero de alta resistencia, ubicados en su extremo inferior.

Las espirales cilíndricas se emplean regularmente en suelos cohesivos, que se encuentren por encima del nivel freático. De tal forma que sea posible la extracción del material perforado. Las espirales cónicas son útiles en suelos con presencia de boleos o también se utilizan como guía en terrenos duros. En la *figura 3.12* se muestran los diversos tipos de brocas.

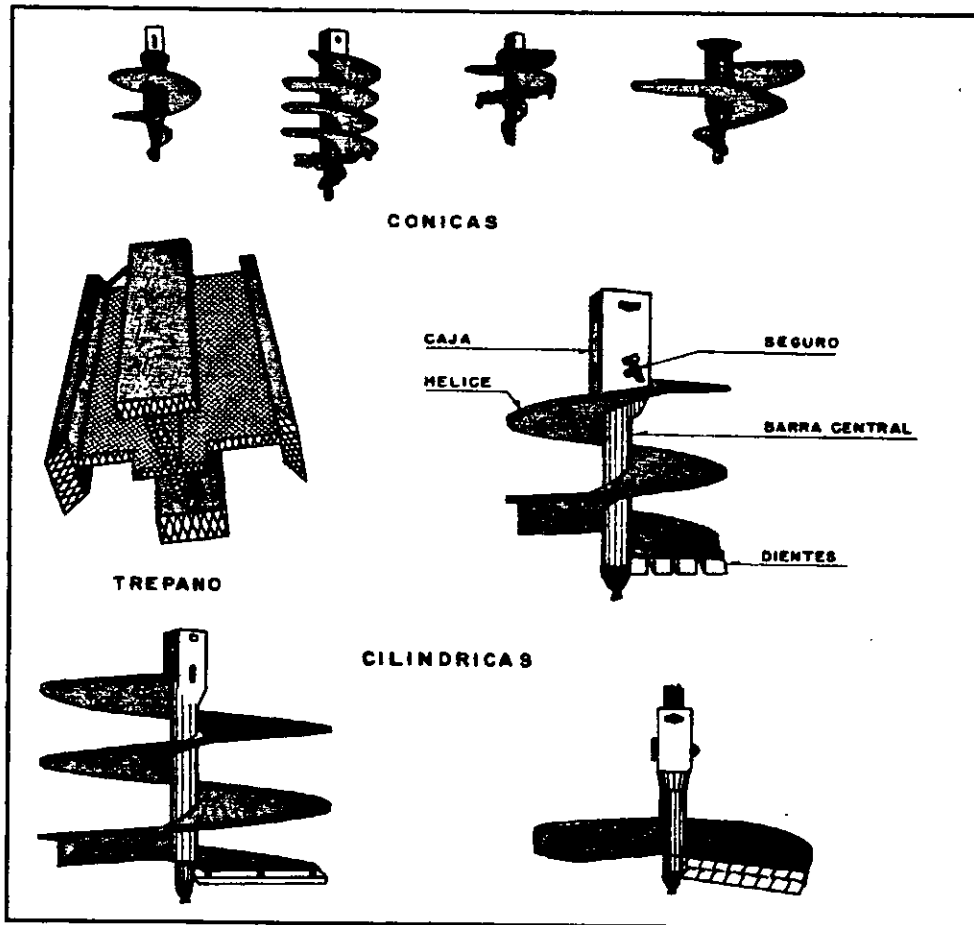


FIGURA 3.12 Brocas espirales.

b) Botes cortadores.

Son cilindros de acero con tapa articulada en la base. En la tapa se encuentran los elementos de corte y unas trampas que permiten la entrada del material cortado, pero impiden su salida. Son utilizados en suelos cohesivos y no cohesivos, y por debajo o encima del nivel freático.

Los botes corona son cilindros abiertos que tienen en su borde inferior dientes de acero de alta resistencia o con inserciones de carburo al tungsteno. Se emplean en suelos duros o rocas suaves, extrayendo el material cortado con un dispositivo cónico en el interior del bote. En la *figura 3.13* se muestran algunos tipos de botes.

c) Trépanos.

Son herramientas de acero de gran peso que trabajan a percusión dejándolas caer libremente desde una altura determinada. Se utilizan para romper rocas o boleos encontradas en la perforación; existen varios tipos y tamaños que se emplean de acuerdo a los problemas específicos que presente la obra en ejecución.

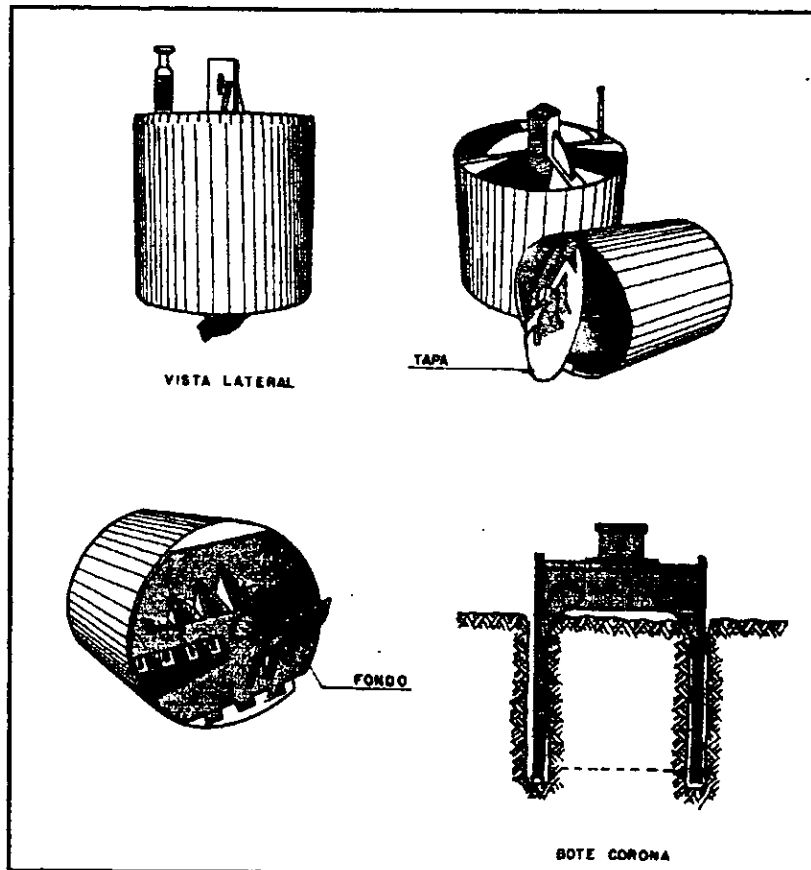


FIGURA 3.13 Botes cortadores.

3.5.4 Pilotes hincados con chiflón.

Si los pilotes deben atravesar estratos compactos de arena o grava, con objeto de apoyarse en un depósito inferior a éstos, puede aflojarse la arena o grava con chiflones. Este procedimiento consiste en la descarga de un chorro de agua o aire cerca de la punta o a los costados del pilote, con un tubo de 5 a 7.5 cm de diámetro, con un estrechamiento en la punta del orden de la mitad de dicho diámetro.

Cuando el suelo sea arenoso la bomba para los chiflones debe ser capaz de descargar 1890 lit-min, a una presión de 10 a 15 kg-cm². El agua afloja la arena y la hace movediza, de forma tal que el pilote puede atravesarla fácilmente. En materiales más gruesos las recomendaciones anteriores pueden aumentar de valor.

No es recomendable tener un solo inyector, ya que estos se tapan y tienden a formar un tapón compacto debajo del pilote, dificultando el hincado. Los chiflones deben estar dispuestos simétricamente en torno a la punta del pilote, para evitar que éste se desvíe de la vertical y estar ligeramente dirigidos hacia arriba. Los tubos fuera del pilote se despegan fácilmente de éste y se desvían. En la figura 3.19 se muestra algunos arreglos del chiflón en la punta del pilote.

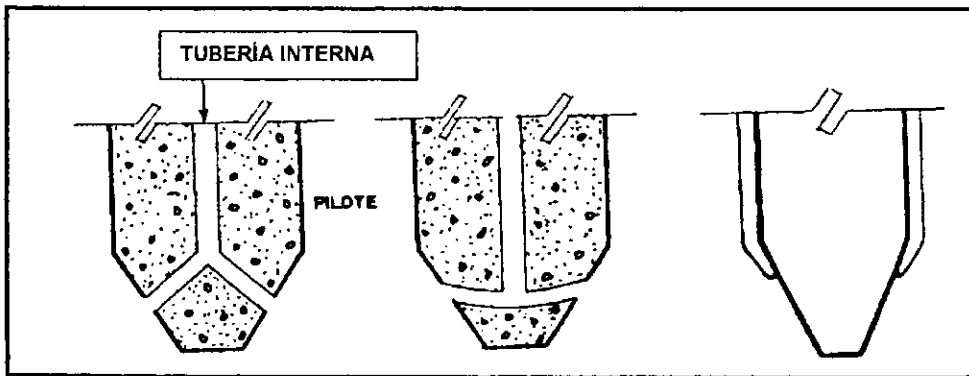


FIGURA 3.19. Arreglos típicos para inyección de agua a presión.

La utilización del chiflón requiere del funcionamiento de una bomba y de conexiones, tuberías y boquillas. La *Tabla 3.6* puede ser útil para elegir el tipo de bomba conveniente; proporciona el gasto necesario para una presión determinada y el diámetro de boquilla del chiflón, en lt/min

Presión en la bomba (Kg/cm ²)	Diámetro de la boquilla (cm)				
	1.90	2.54	3.18	3.50	3.81
	GASTOS				
7	605	1040	1510	1740	1950
10	740	1290	1870	2160	2420
14	830	1500	2200	2540	2800

TABLA 3.6. Gasto necesario para chiflón con tubería de 2 ½ " y 15 m de longitud.

Los chiflones pueden utilizarse tanto en arenas como en arcillas, aunque en estas últimas no es muy usado, esto debido al mayor peligro de taponamiento en la punta del pilote y a la dificultad para eliminar el agua en la punta del pilote. No es posible utilizar pilotes en gravas gruesas o roca.

Los estratos relativamente delgados de arcillas firmes o roca blanda a poca profundidad, pueden atravesarse en ocasiones con pulsetas, aunque el uso de estas es mas bien raro. El uso de chiflón es común.

La operación del chiflonaje debe suspenderse cuando menos un metro arriba del nivel de desplante definitivo del pilote, de no hacerse así, se corre el peligro de aflojar el nivel de apoyo, disminuyendo la resistencia

CAPITULO IV.

DISEÑO GEOTÉCNICO.

CAPÍTULO IV. DISEÑO GEOTÉCNICO

En el proceso de selección y diseño de las cimentaciones a base de pilotes es necesario elegir y utilizar varios métodos de análisis geotécnico. En presencia de problemas de diversa índole y de propósitos de diseño diversos, el ingeniero se encuentra con una amplia gama de posibilidades de solución que responden a exigencias de precisión, grado de complejidad, volumen de cálculos, necesidad de utilizar computadora y al alcance de las investigaciones del subsuelo en campo y laboratorio. Debido a la índole semiempírica de los diversos métodos, la aplicación confiable de estos requiere del usuario la comprensión profunda de sus alcances y limitaciones. Por lo tanto es aconsejable que al seleccionar el método considere aquellos con suficiente soporte experimental y de pruebas de campo documentadas.

Conviene tener presente que durante el diseño de una cimentación se pueden cometer graves errores, que pueden ser, entre otros:

- Utilizar una carga de proyecto errónea.
- Las condiciones del subsuelo son diferentes a las previstas.
- La teoría utilizada es inadecuada o imprecisa.
- No se define correctamente la susceptibilidad de la estructura a movimientos diferenciales.
- Los defectos de fabricación en la cimentación son tan importantes que pueden invalidar el diseño, aún cuando el conocimiento de cargas, condiciones del subsuelo y teorías sea excelente.

El diseño de una cimentación debe satisfacer dos requisitos esenciales:

- *Debe contar con un coeficiente de seguridad apropiado por carga última.*
- *Los asentamientos deben estar dentro del rango permisible para la superestructura.*

En un caso particular, uno de los conceptos anteriores ha de regir el dimensionamiento de los pilotes. Por lo anterior es necesario realizar el cálculo de la capacidad de carga y los asentamientos que se presenten. La influencia del tipo de suelo será determinante, ya que por ejemplo, mientras en una arcilla, los asentamientos determinarán las dimensiones de los pilotes, en arenas densas los asentamientos son pequeños y por tanto el diseño es regido por la capacidad de carga.

La capacidad de carga de una cimentación profunda depende en gran medida de la resistencia al corte del suelo en el cual se apoya y el mecanismo de transferencia de carga del elemento de cimentación al suelo. Por otra parte la sensibilidad de la superestructura a los asentamientos debe tomarse en cuenta, sabiendo que las superestructuras muy flexibles como las rígidas pueden considerarse como insensibles a los asentamientos, debido a que las primeras son capaces de absorber las deformaciones provocadas y las segundas se asientan como bloque. En la *tabla 4.1* se presentan los asentamientos diferenciales tolerables en algunas estructuras.

Los procedimientos constructivos son determinantes en el comportamiento de las cimentaciones piloteadas, debe darse una gran importancia a la supervisión de los aspectos técnicos durante la construcción. Es necesario realizar siempre pruebas de carga para revisar la validez del diseño, esto porque actualmente el mejor método de cálculo no es tan confiable como una prueba de carga en el sitio. En este capítulo se presentan algunos de los diversos métodos existentes para realizar el diseño geotécnico de cimentaciones a base de pilotes.

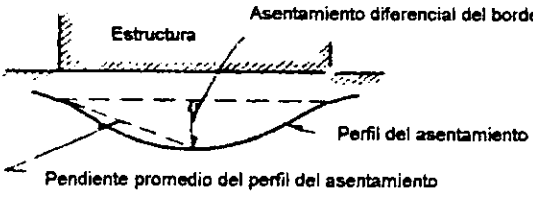
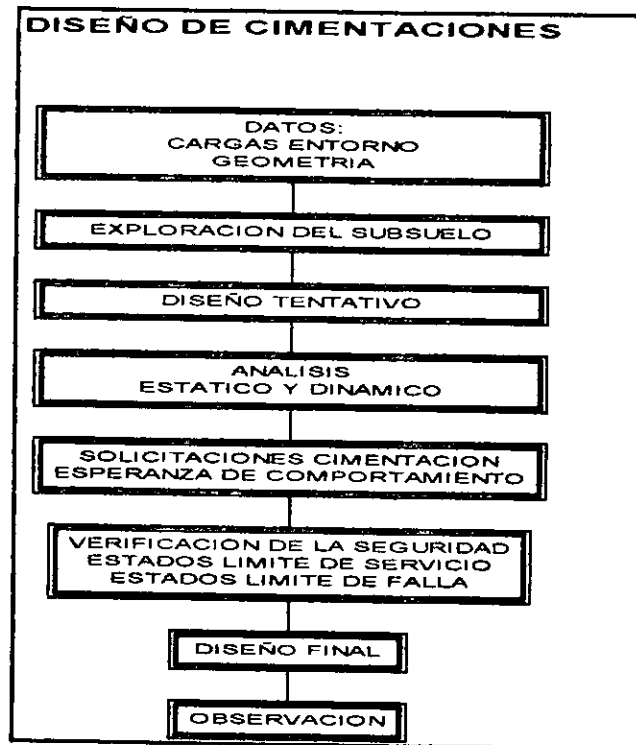
Tipo de estructura	Asentamiento diferencial tolerable	Observaciones
Tanques estacionarios de acero para almacenamiento de petróleo u otro fluido Extremo fijo Extremo móvil	Unidades en radianes de la pendiente del perfil de asentamiento 0.008 0.002 a 0.003 Dependiendo de los detalles de la tapa flotante.	Valores aplicados a tanques sobre base flexible. Las losas rígidas para la base no permitirán los asentamientos sin fisuramiento y pandeo local.
Guías para grúas móviles	0.003	Valor tomado longitudinalmente a lo largo de la guía. El asentamiento entre guías generalmente no rige el problema.
Losa de cimentación circular o zapatas anulares rígidas, para estructuras rígidas esbeltas y altas como torres, silos y tanques de agua.	0.002 Pendiente transversal de cimentaciones rígidas.	
Tuberías forzadas de concreto con juntas	0.015 Variación del ángulo en una junta en radianes	La máxima variación angular de la junta es generalmente de 2 a 4 veces el promedio de las pendientes del perfil de asentamiento. El daño a la junta depende de la extensión longitudinal.
Estructuras de acero de 1 o 2 plantas, armaduras para techo, almacenes con muros flexibles.	0.006 a 0.0006	La presencia de grúas móviles y líneas de transmisión puede restringir el asentamiento tolerable
Casas de 1 o 2 plantas con muros de carga de ladrillo y estructuras ligeras.	0.002 a 0.003	Valores mayores son tolerables si la mayor parte del asentamiento ocurre antes de completar el acabado interior.
Estructuras con acabado interior o exterior relativamente insensible, como mampostería en seco, paneles móviles o de vidrios.	0.002 a 0.003	Desperfectos en la estructura pueden limitar los asentamientos.
Estructuras con acabado interior o exterior relativamente insensible, como mampostería en seco, paneles móviles o de vidrios.	0.001 a 0.002	Valores mayores son tolerables si la mayor parte del asentamiento ocurre antes de terminar la obra.
Estructuras rígidas de concreto pesado de varias plantas sobre losa de cimentación estructurada de $\pm 1.20\text{m}$ de espesor.	0.0015	Daños al acabado interior o al exterior pueden limitar los asentamientos tolerables.
		El asentamiento diferencial tolerable es expresado en términos de la pendiente del perfil del asentamiento.
		Valor de 0.001 \approx 1 cm de asentamiento diferencial en 9.6 m de distancia.
		Valor de 0.008 \approx 8 cm de asentamiento diferencial en 9.6 m de distancia.

TABLA 41. Asentamientos diferenciales tolerables en estructuras.

4.1 PROCESO DEL DISEÑO GEOTÉCNICO

El análisis de una cimentación piloteada comienza con la selección de aquellos elementos constructivos que sean compatibles con la estratigrafía y las propiedades mecánicas de los suelos o rocas del sitio donde se ubica la obra. El siguiente paso es la determinación de la profundidad de la cimentación y el dimensionamiento de los elementos elegidos. Una vez realizado el análisis anterior se procede a emitir las recomendaciones de los procesos de construcción, que deben ser los más adecuados para las características de la obra y el sitio y que deben cumplir con los requisitos y las normas establecidas. Debe realizarse además una predicción sobre el comportamiento futuro de la estructura. En el *cuadro 4.1* se muestran las etapas del diseño de una cimentación profunda, a continuación se describirán algunas de ellas:



CUADRO 4.1 Proceso de diseño de una cimentación.

4.1.1 Datos, cargas, entorno y geometría.

Es importante en esta etapa, que marca el inicio del diseño, contar con datos ciertos sobre la estructura a cimentarse, así como de las cargas a las que la misma debe estar sometida, de igual manera es importante analizar el medio que rodeará a la estructura, es decir las estructuras vecinas y la posible interacción que puedan tener con la que se está diseñando, también es importante saber si existen estructuras cimentadas con el sistema que se está proyectando y cual ha sido su comportamiento. Debe determinarse la influencia de la geometría de la estructura en el comportamiento de los pilotes que se diseñan. La selección del tipo de pilote y el método de construcción más adecuado debe basarse en el estudio de las condiciones de apoyo, la mecánica de suelos y en la experiencia local en ciertos tipos de cimentación.

4.1.2 Investigación del subsuelo.

Los métodos de exploración del subsuelo y las pruebas de laboratorio son en lo general similares a las utilizadas en otro tipo de cimentaciones. Los resultados de los estudios anteriores sirven para determinar las características físicas y mecánicas de los depósitos naturales, que han de utilizarse para el cálculo de la capacidad de carga y de la magnitud de los asentamientos. Debe considerarse en el análisis la alteración en los esfuerzos iniciales, la resistencia al corte y las propiedades de deformación causada por la instalación de los pilotes. La importancia de esta etapa radica en que los datos que arroja son utilizados para proponer una longitud tentativa y la capacidad de carga en base a las características del suelo, por ello es importante que las pruebas y sondeos se realicen en forma adecuada y con precisión.

4.1.3 Diseño tentativo.

En esta etapa se define tentativamente el tipo, longitud, separación entre elementos, y capacidad de carga individual y en grupo de pilotes, para estimar los costos probables de la cimentación y juzgar la realización de pruebas antes del diseño final o durante la construcción.

Como resultado de los estudios del subsuelo, se selecciona el o los estratos de apoyo y se estima la longitud necesaria de penetración en dichos estratos, se puede definir la longitud probable de los pilotes. Cuando los sondeos muestren la existencia de roca o estratos de suelo duro, bien definidos, a una profundidad económicamente aceptable, será posible transmitir las cargas por elementos trabajando por punta, la longitud de los pilotes se puede estimar con precisión si no existe asentamiento regional.

Si los pilotes atraviesan estratos de suelo cohesivo o se encuentran debajo de la punta, se debe definir el tipo y longitud de pilotes y el tamaño y geometría de la estructura, para reducir al mínimo los asentamientos finales.

Cuando se presenten estratos duros o boleos que tengan que ser atravesados por los pilotes, se debe analizar los procesos constructivos para dar solución a este problema.

4.1.4 Análisis estático y dinámico.

Para la determinación del número y capacidad de carga de pilotes debe realizarse la revisión de las dos condiciones siguientes:

- Condiciones estáticas.- Considera la combinación de cargas permanentes mas carga viva máxima que deben ser afectadas por un factor de carga, que depende del tipo e importancia de la estructura.
- Condiciones dinámicas.- Considera la combinación de cargas permanentes mas carga viva, con intensidad y acción accidental más crítica (incremento de esfuerzos provocado por momento de volteo debido a sismo, viento u otro fenómeno) afectada por un factor de carga de 1.1

4.1.5 Verificación de la seguridad.

La capacidad de carga de una cimentación debe definirse de acuerdo con dos criterios fundamentales:

- a) La capacidad de carga última.- Carga promedio por unidad de área que origina la falla de una cimentación por esfuerzo cortante o asentamiento excesivo. Estado límite de falla.
- b) Capacidad de carga permisible.- Carga promedio por unidad de área que no provocará asentamientos mayores a los admisibles para la estructura y que proporciona un factor de seguridad adecuado contra la falla por esfuerzo cortante. Estado límite de servicio.

4.2 ANALISIS POR CARGAS VERTICALES.

4.2.1 Análisis Estático por Carga Última.

Los desplazamientos verticales de un pilote, producidos por las cargas que soporta, generan fuerzas resistentes en el suelo en contacto con el fuste y por debajo de la base. Se han desarrollado fórmulas, en condiciones de equilibrio límite, para el cálculo de la capacidad de carga en forma separada, es decir por punta y fricción. Para cierto nivel de carga los asentamientos resultan desfavorables para su función o riesgosos, por tanto es necesaria la determinación de un valor tolerable o seguro de capacidad de carga.

4.2.1.1 Método estático.

Se aplican principios de la mecánica de suelos para plantear expresiones de capacidad de carga, cuyos parámetros se deducen de las características del suelo medidas en la exploración del mismo. La capacidad de carga de un pilote aislado, instalado dentro del suelo de soporte, para resistir cargas depende de las siguientes componentes de la resistencia del sistema suelo - pilote:

1. Para que la punta del pilote sea desplazada, por acción de la carga se requiere que el suelo inmediatamente debajo y a los lados de la punta sea desplazado de su sitio original. El suelo ofrece resistencia al corte producido por el desplazamiento.
2. El desplazamiento hacia abajo del pilote implica un movimiento relativo suelo-pilote, que moviliza las fuerzas resistentes tangenciales sobre la superficie lateral del pilote. Estas fuerzas provienen de la adherencia y fricción del suelo en contacto con el pilote.
3. El pilote ocupa después de instalado el lugar de cierto volumen de suelo, cuyo peso fue previamente soportado por el suelo debajo de la base del pilote. Si la profundidad de tal base es D y el peso volumétrico promedio a lo largo de esta profundidad es γ_m , entonces sobre el plano horizontal a este nivel actúa en equilibrio, antes de instalar el pilote una presión vertical $\gamma_m D$.

La capacidad de carga última del pilote, originada en la transferencia de cargas al suelo, es una superposición aproximada de estas componentes. Ver figura .4.1

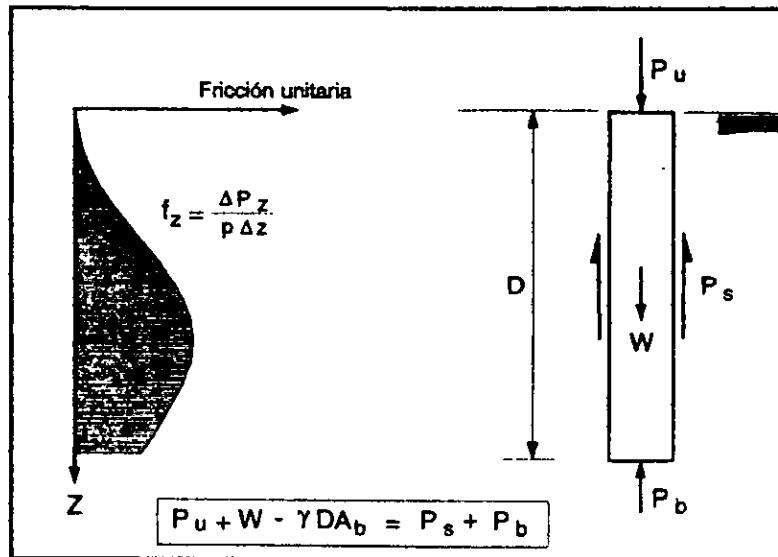


FIGURA 4.1 Capacidad de carga por transferencia al suelo.

Si se plantea el equilibrio estático de las fuerzas verticales que intervienen, se obtiene la siguiente expresión:

$$P_u + W - \gamma_m D A_b = f_{su} A_s + q_{bu} A_b \quad \text{Ec 4.1}$$

Donde:

- P_u = Carga última en la cabeza del pilote.
- W = Peso propio del pilote.
- $\gamma_m D A_b$ = Peso del suelo desalojado.
- f_{su} = Resistencia unitaria última por fricción lateral.
- q_{bu} = Resistencia unitaria última en la base.
- A_s = Área lateral del pilote sobre el cual se ejerce fricción positiva.
- A_b = Área de la base.

El lado izquierdo de la ecuación 4.1 es la carga neta por soportar. El término $\gamma_m D A_b$ representa la carga del suelo soportada a nivel de base, que se reemplaza por el peso del pilote; por lo que la resistencia unitaria en la base es la resistencia neta última. En pilotes sin ensanchamiento en la base es poco importante la diferencia entre resistencia neta y resistencia total, pero para el caso de pilotes acampanados en la base debe realizarse un análisis distinto, que no se tratará en el presente trabajo.

En ocasiones se considera que W y $\gamma_m D A_b$ son iguales y la ecuación anterior se simplifica quedando:

$$P_U = f_{su} A_s + q_{bu} A_b \quad \text{Ec 4.2}$$

Para determinar la capacidad de carga segura por medio de análisis estático por carga última, se calcula la carga más alta que puede soportar un pilote aislado (P) como la suma de la resistencia última por fricción lateral (P_u) y la resistencia última por punta (P_b), y se divide cada uno de los términos por un factor de seguridad (F_s y F_b). Esta relación se describe en la siguiente ecuación:

$$P_U = \frac{P_u}{F_b} + \frac{P_b}{F_b} + \frac{A_b q_{bu}}{F_b} + \frac{A_s f_{su}}{F_s} \quad \text{Ec 4.3}$$

Donde

- F_s = Factor de seguridad para carga última por fricción lateral.
- F_b = Factor de seguridad para carga última por punta.
- P_s = Resistencia última por fricción lateral.
- P_b = Resistencia última por punta.

En el establecimiento de los factores de seguridad, ya sea por punta o fricción, intervienen diversos factores, que tienen que ver con el pilote (Tipo, características y geometría), características del suelo (valores unitarios de fricción, resistencia y compresibilidad del suelo) y varían con la práctica regional, las normas de diseño y las recomendaciones de investigadores y tratadistas, revisadas mediante pruebas de carga instrumentadas.

La limitación del método estático se encuentra en su incapacidad para considerar la interacción fricción - punta en un pilote, sin un conocimiento previo de la relación de distribución de cargas. La aplicación adecuada de este método depende de la apropiada determinación de la resistencia por punta y fricción y de la cuantificación de los factores de seguridad.

4.2.1.2 Resistencia última unitaria por Punta,

a) Ecuación de capacidad de carga.

En el método estático se determina la componente de la resistencia aportada por la punta, como el valor unitario de la resistencia por el área de la base o punta del pilote. En la mecánica de suelos se considera esta resistencia como la capacidad de carga de un cimiento cuya área es la punta del pilote, ubicado al nivel de ella y se representa con la siguiente ecuación:

$$q_{bu} = c N_c + P_o N_q \quad \text{Ec 4.4}$$

Donde

- c = Cohesión del suelo.
- P_o = Presión vertical efectiva en el terreno al nivel de la punta.

N_c y N_q = Factores adimensionales que dependen de (ϕ)

Se han propuesto diversas soluciones para la determinación de los parámetros N_c y N_q , entre ellas las de la teoría plástica pura, pero han sido desechadas por no corresponder al comportamiento real del suelo. No existe actualmente una solución teórica satisfactoria. En la figura 4.2 se muestran los resultados de las investigaciones antes mencionadas.

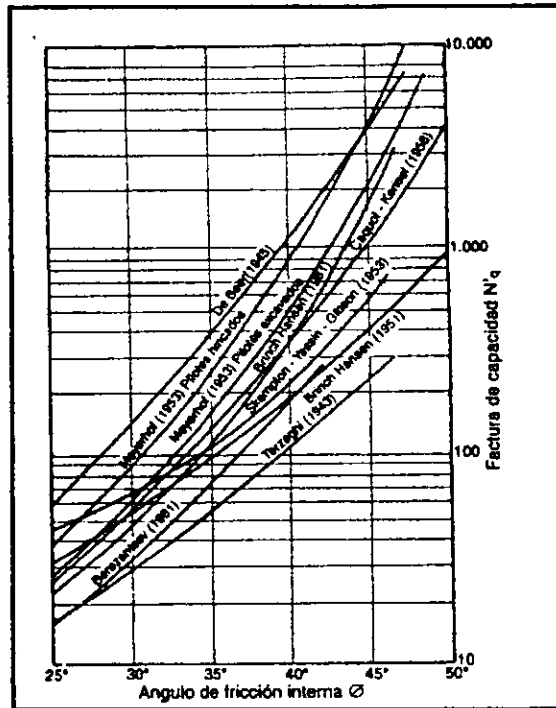


FIGURA 4.2 Factores de carga N_q según varios autores.

Se mencionan a continuación algunos conceptos relativos a la validez y aplicabilidad de la ecuación 4.4, como un valor de capacidad de carga:

1. Se ha demostrado que la capacidad por punta depende del esfuerzo normal medio (σ_o) que está ligado a P_o por medio de la ecuación 4.5 y no directamente del esfuerzo vertical en el terreno (P_o).

$$\sigma_o = \frac{1+2K_o}{3} P_o \quad \text{Ec 4.5}$$

Donde:

K_o = Coeficiente de presión lateral de tierras en reposo.

2. Las teorías de capacidad de carga no consideran racionalmente el efecto de la compactación producida por el hincado en suelos granulares sin cohesión. Las soluciones propuestas son generalmente de aplicación delicada debido a que es determinante la condición del suelo previa al hincado, el volumen desplazado y los efectos de las operaciones constructivas.
3. Experimentos y observaciones en campo han demostrado que las relaciones teóricas son válidas solo cuando la punta del pilote queda por encima de una profundidad crítica.

4.2.1.3 Teoría de Zeevaert.

Esta teoría se utiliza para resolver la capacidad de carga por punta en pilotes en un suelo cohesivo-friccionante.

La expresión general dada por Zeevaert es la siguiente:

$$Q_p = \delta_1 A [cN_c + PdN_q] (Cr + 0.1) \quad \text{Ec 4.6}$$

Donde:

- δ_1 = Coeficiente igual a 1.2 en cimiento cuadrado o circular.
- A = Área de la sección transversal del pilote.
- C = Cohesión.
- \overline{Pd} = Presión efectiva a nivel de desplante del cimiento.
- Cr = Compacidad relativa. Suelo denso 0.9, medianamente denso 0.6 y suelto 0.6.
- N_c y N_q = Factores de capacidad de carga obtenidos a partir del ángulo de fricción interna de la figura 4.3

Se recomienda utilizar esta teoría cuando el pilote está incrustado en la capa dura.

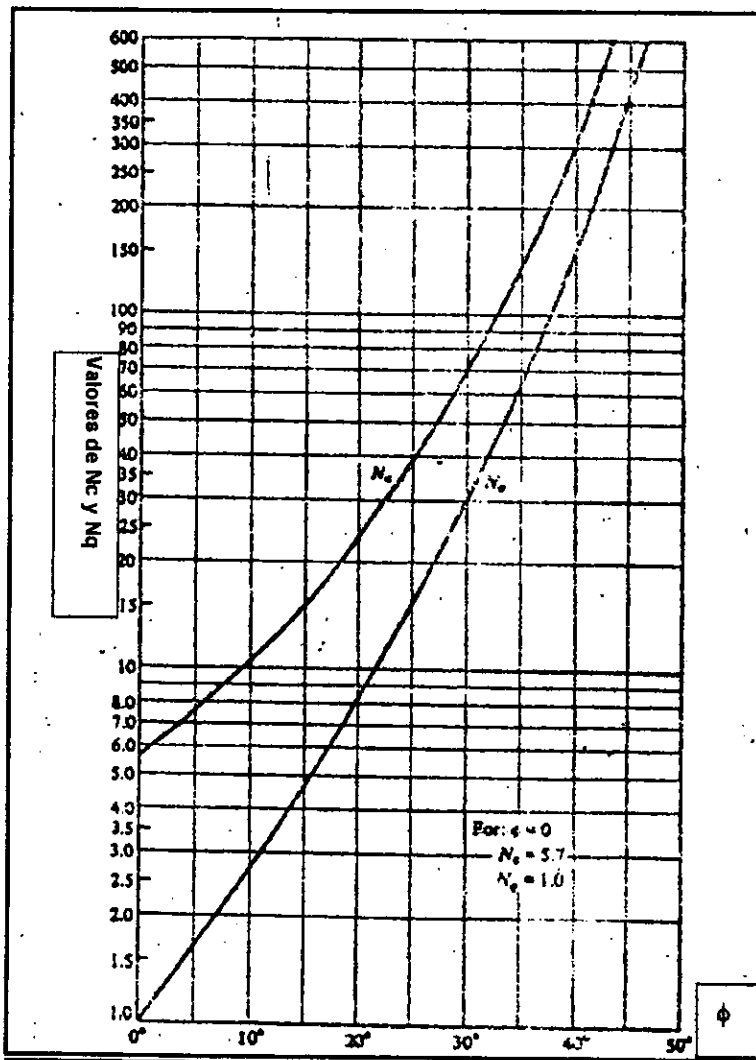


FIGURA 4.3 Factores de capacidad de carga para cimientos profundos. Zeevaert.

4.2.1.4 Resistencia última por fricción.

En la ecuación 4.1 se expresó la componente de la capacidad de carga última por fricción (P_s) como el producto de la resistencia unitaria promedio (f_{su}) multiplicada por el área lateral del pilote (A_s) que se encuentra en contacto con el suelo. Cuando un pilote atraviesa varios mantos de diferente fricción unitaria es conveniente expresarla como:

$$P_s = \sum p \Delta L f_{su} \quad \text{Ec 4.7}$$

Donde:

- p = Perímetro de la sección del pilote.
- ΔL = Longitud de pilote embebida en cada manto.
- f_{su} = Resistencia unitaria última por fricción lateral en cada estrato.

Para determinar f_{su} se ha utilizado una concepción física similar a la aplicable en la determinación de la resistencia al deslizamiento de un cuerpo rígido en contacto con el suelo. Comúnmente f_{su} se divide en dos partes: adherencia (c_a), independiente del esfuerzo normal del suelo sobre el fuste del pilote y fricción, proporcional al esfuerzo normal del suelo sobre el pilote, lo anterior se expresa en la ecuación 4.8.

$$f_{su} = c_a + q_s \tan \delta \quad \text{Ec 4.8}$$

Donde:

- c_a = Adherencia unitaria.
- $\tan \delta$ = Coeficiente de fricción entre suelo y pilote.
- q_s = Esfuerzo normal del suelo sobre el pilote.

El factor q_s se considera relacionado con el esfuerzo vertical efectivo q_v , al mismo nivel, por medio de un coeficiente de empuje lateral para fricción superficial (K_s) definido como q_s/q_v y la fricción queda como:

$$f_{su} = K_s q_v \tan \delta \quad \text{Ec 4.9}$$

El coeficiente K_s varía ampliamente con las condiciones iniciales de esfuerzos en el terreno y con los procedimientos de instalación, la forma y la longitud del pilote tienen también cierta incidencia en su valor.

4.3 PILOTES EN SUELOS FRICCIONANTES.

4.3.1 Resistencia por punta

El valor de la capacidad de carga por punta de pilotes en suelos granulares puede calcularse eliminando el término correspondiente a la cohesión de la ecuación 4.4 por lo que la expresión para analizar la capacidad de carga por punta en suelos friccionantes queda como:

$$q_p = \rho_o N' q \quad \text{Ec 4.10}$$

Siendo:

$$N'_q = \frac{1}{3} (1+2K_0)N_0 = \quad \text{Ec 4.11}$$

El cálculo del factor de capacidad de carga N_c para el esfuerzo normal medio toma en cuenta el efecto de deformabilidad del suelo antes de la falla, basándose en un mecanismo realista de falla. En la *figura 4.4* se muestra los valores de N_c en función del ángulo de resistencia al corte ϕ' y del índice de rigidez I_r del suelo, el cual, en condiciones no drenadas (cambio volumétrico nulo), está dado por la *ecuación 4.12*.

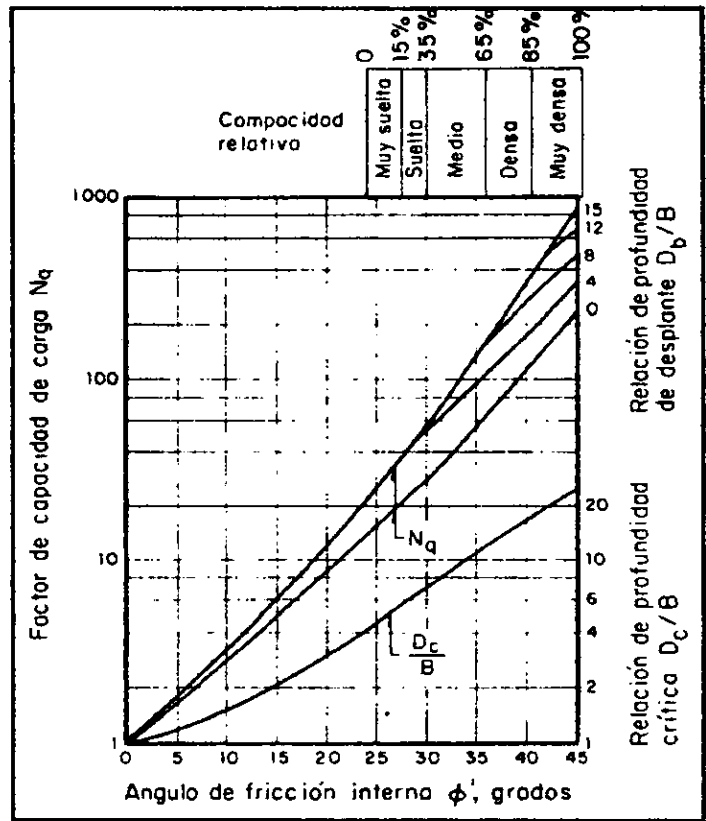


FIGURA 4.4 Factores de capacidad de carga y relaciones de profundidad crítica para pilotes hincados.

$$I_r = \frac{E}{2(1+\nu)\sigma_0 \tan\phi} \quad \text{Ec 4.12}$$

Donde:

- E = Módulo de deformación.
- ν = Relación de Poisson.

En la *figura 4.5* puede observarse la influencia el factor I_r en la magnitud de N_c para un mismo valor del ángulo de fricción ϕ' .

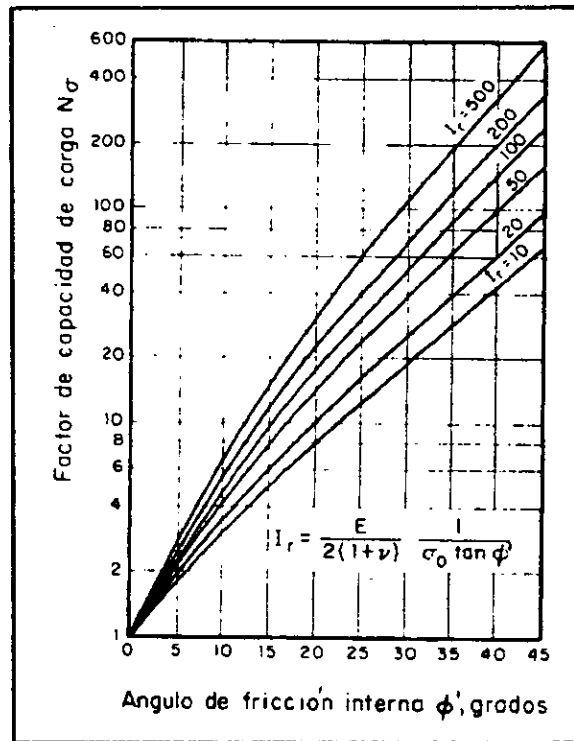


FIGURA 4.5 Variación del factor de capacidad de carga $N\sigma$ en función de I_r y ϕ' .

Mediante el análisis de los resultados de diversas pruebas realizadas Vesic (1963) y Kerisel (1964), han demostrado que para valores de la relación de profundidad de la punta a ancho del pilote (D/B) mayores que 5 en suelos granulares homogéneos, la resistencia de base no aumenta con la profundidad en forma proporcional a la presión vertical (P_0). La tasa de aumento disminuye y N_q alcanza un valor constante, dependiente de ϕ para valores de D/B mayores de 15. Los resultados se muestran en las figuras 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9.

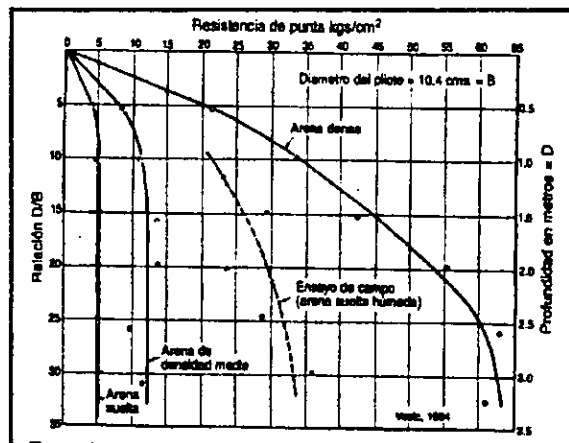


FIGURA 4.6 Resistencia de punta en pilotes en arenas homogéneas. Según Vesic.

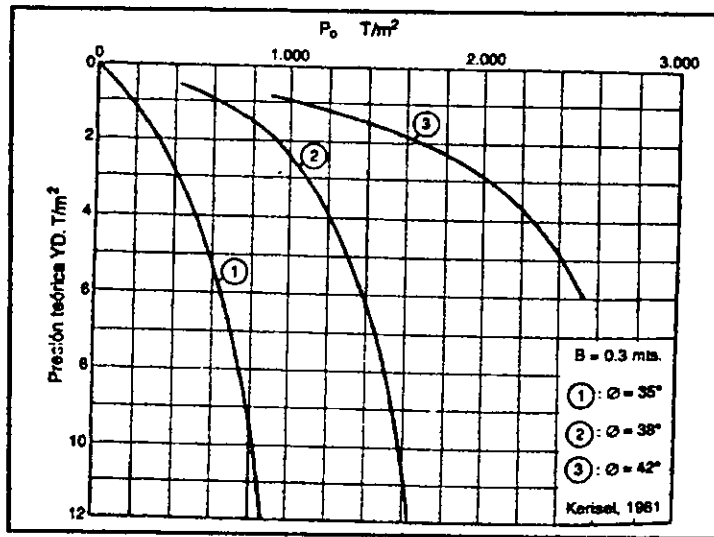


FIGURA 4.7 Resistencia de punta en pilotes en suelos granulares. Según Kerisel I.

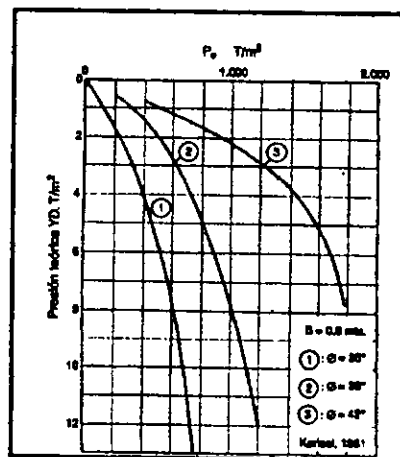


FIGURA 4.8 Resistencia de punta de pilotes en suelo granular. Según Kerisel II.

Caquot y Kerisel propusieron la siguiente expresión para determinar el factor de Capacidad de carga:

$$N_q = 10^{N \tan \phi} \quad \text{Ec 4.13}$$

Donde N varía según las características del suelo y el diámetro del pilote. Un valor de $N = 2.7$ corresponde a un diámetro de 32 cm, los resultados muestran que el factor de escala es determinante en el valor de N_q . Delgado propone que los valores de N se ajusten para que los resultados se aproximen a los de Berezantzev mediante la siguiente expresión:

$$N_q = 10^{[2.6 + 0.01(\phi - 30) \tan \phi]} \quad \text{Ec 4.14}$$

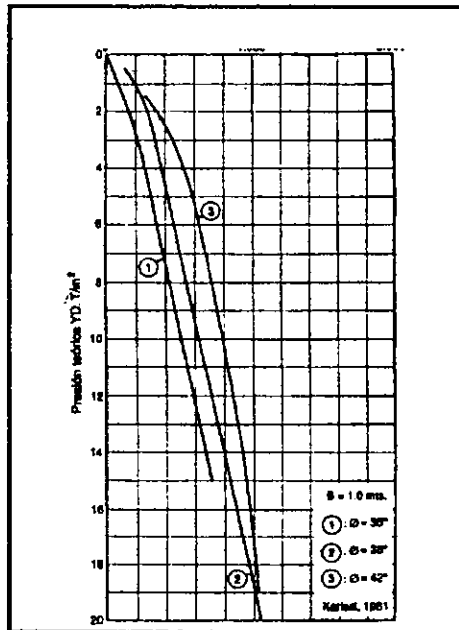


FIGURA 4.9 Resistencia de punta en pilotes en suelos granulares. III según Kerisel.

Mediante la aplicación de esta ecuación se demuestra que la ecuación de Berezantzev y la propuesta por Caquot y Kerisel conducen a resultados análogos.

Prakash y Sharma, basados en pruebas de carga de diferentes pilotes realizadas por Meyerhof proponen valores para N_q que se presentan en la siguiente tabla:

ϕ°	20	25	28	30	32	34	36	38	40	42	45
N_q Hincado	8	12	20	25	35	45	60	80	120	160	230
N_q Perforado	4	5	8	12	17	22	30	40	60	80	115

TABLA 4.2 Valores de N_q en función de ϕ para pilotes hincados y perforado.

Si se usan los valores de la tabla anterior, el manual NAVFAC DM-7.2 recomienda utilizar un factor de seguridad de 2 para cargas transitorias y de 3 para cargas permanentes.

Las Normas Técnicas para Diseño de Cimentaciones aplicables al Reglamento de Construcciones del Distrito Federal presentan la siguiente expresión para el cálculo de la capacidad de carga por punta en suelos friccionantes.

$$C_p = \left[p_v N^* q F_R + P_v \right] A_p \quad \text{Ec 4.15}$$

Donde:

- C_p = capacidad de carga por punta, ton.
- A_p = Área transversal del pilote, m^2 .
- P_v = Presión vertical debida al peso del suelo a la profundidad de desplante de los pilotes ton/m^2 .
- F_R = Factor de resistencia igual a 0.35

N^*q = Coeficiente de capacidad de carga definido por:

$$N^*q = N_{min} + L_e (N_{max} - N_{min}) / 4B \tan(45 + \phi/2) \quad \text{Ec 4.16}$$

Cuando

$$L_e/B \leq 4 (\tan 45^\circ + 0.5 \cdot \phi)$$

O bien:

$$N^*q = N_{max} \quad \text{Ec 4.17}$$

Cuando

$$L_e/B > 4 \tan(45^\circ + 0.5 \cdot \phi)$$

Donde:

L_e = Longitud empotrada del pilote en el estrato resistente, m.

B = Ancho o diámetro del pilote, m.

ϕ = Angulo de fricción interna, en grados.

En la *Tabla 4.3* se muestran los valores de N_{max} y N_{min} en función de ϕ .

ϕ°	20	25	30	35	40
N_{max}	12.5	26	55	132	350
N_{min}	7	11.5	20	39	78

TABLA 4.3 Valores de N_{max} y N_{min} en función de ϕ

Cuando el diámetro o base de los pilotes sea mayor de 0.5 m, la capacidad de carga debe afectarse por un factor, para considerar el efecto de escala, con la siguiente expresión:

$$F_{re} = [(B + 0.5 / 2b)^n] \quad \text{Ec 4.18}$$

donde:

n = Exponente igual a 1 para suelo suelto, 2 para suelo medianamente denso y 3 para suelo denso.

Al tomar en cuenta el efecto de escala se reduce drásticamente la capacidad de carga. Por lo anterior, se ha propuesto utilizar un factor $n=1$ para todos los tipos de suelo, basándose en la experiencia local.

La capacidad de carga permisible por punta en un pilote individual de diámetro B y longitud L_p se calcula como sigue:

Para $L_p < D_c$:

$$Q_a = \frac{1}{3} \left[q_p \frac{\pi B^2}{4} + \frac{f_s}{2} \pi B L_p \right] \quad \text{Ec 4.19}$$

Donde:

L_p = Longitud del pilote.

D_c = Longitud crítica de desplante.

Donde q_p y f_s se calculan a una profundidad L_p

Para $L_p > D_c$:

$$Q_a = \frac{1}{3} \left[q_p \frac{\pi B^2}{4} + \frac{f_s}{2} \pi B D_c + f_s \pi B D_c + f_s \pi B (l_p - D_c) \right] \quad \text{Ec 4.20}$$

Estas expresiones incluyen un factor de seguridad de 3 aplicado en cimentaciones profundas. Se propone que el factor de seguridad debe evaluarse considerando dos componentes:

- La carga supuesta como base del diseño.
- La resistencia del suelo de soporte.

4.3.2 Resistencia por fricción lateral de pilotes en suelos granulares.

La fricción lateral de pilotes en suelos granulares sin cohesión puede calcularse con la expresión 4.7, si se anula el término de la adherencia y la ecuación queda como sigue:

$$f_{su} = K_s q_v \tan \delta \quad \text{Ec 4.21}$$

Como ya se mencionó K_s es el coeficiente de empuje lateral y δ es el ángulo de fricción en la interfase suelo pilote.

K_s depende del método de instalación del pilote y de la compactación inicial de la arena. No existe un método racional para determinar el valor de K_s . Se acostumbra utilizar correlaciones empíricas basadas en resultados obtenidos en pruebas de carga, sin embargo estos resultados dependen de la interpretación, el procedimiento de ejecución de la prueba y de la influencia que tenga el procedimiento de instalación del pilote. Estas correlaciones conducen a valores de K_s muy diversos.

El investigador Das (1984) propone las siguientes recomendaciones para obtener el valor de K_s , a partir del coeficiente de empuje de tierras en reposo.

Para pilotes con excavación previa:

$$K_s = K_o = 1 - \sin \phi \quad \text{Ec 4.22}$$

Para pilotes hincados con pequeño desplazamiento:

$$\begin{array}{ll} K_s = K_o & \text{Límite inferior} \\ K_s = 1.4 K_o & \text{Límite superior} \end{array} \quad \text{Ec 4.23}$$

Para pilotes hincados, con desplazamiento:

$$\begin{array}{ll} K_s = k_o & \text{Límite inferior} \\ K_s = 1.8 K_o & \text{Límite superior} \end{array} \quad \text{Ec 4.24}$$

Los investigadores Fleming y Randolph (1985) sugieren relacionar K_s con el factor de carga N_q , para pilotes de gran desplazamiento con la ecuación 4.25.

$$K_s = N_q / 50 \quad \text{Ec 4.25}$$

Esta ecuación da valores que varían de 1.5, con bajos niveles de esfuerzo y decrecen a 1.0 conforme aumenta la profundidad. Tienen en general un valor promedio de 1.2.

El American Petroleum Institute, API, (1984) propone valores de K_s de 0.8 para pilotes tubulares con extremo abierto, en compresión y tensión, y de 1.0 para pilotes con gran desplazamiento.

En la *Tabla 4.4* se presentan valores de K_s y δ propuestos por Broms para pilotes hincados, Estos valores toman en cuenta la compactación inducida durante la instalación del pilote. Se recomienda verificar los valores de K_s y $\tan \delta$ con pruebas de carga.

Material del Pilote	Arena suelta	Arena densa	δ
Concreto	1.0	2.0	$3/4 \phi$
Acero	0.5	1.0	20°
Madera	1.5	4.0	1.5ϕ

TABLA 4.4. Valores de K_s y δ , según Broms.

La *ecuación 4.20* considera que en un suelo granular uniforme la capacidad de carga crece en forma continua con la profundidad de la penetración, sin embargo diversas pruebas de carga han demostrado que esto no se ajusta a la realidad y que a una profundidad de 10 a 20 diámetros de pilote, similar a la resistencia por punta, se presenta un comportamiento diferente. Varios investigadores proponen profundidades límites de entre 15 y 20 diámetros. Como base para el análisis, Vesic, demostró mediante pruebas rigurosamente controladas que para una profundidad entre 15 y 20 diámetros se alcanza un valor pico en la fricción lateral, que no aumenta a mayores profundidades. Ver *figura 4.9*.

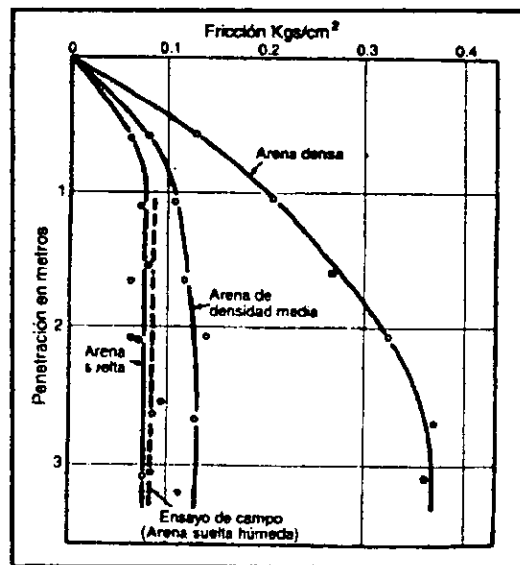


FIGURA 4.10 Resistencia por fricción lateral según Vesic.

4.3.3 Capacidad de carga según la penetración estándar.

La capacidad de carga última de un pilote individual puede evaluarse en base a los resultados del ensayo de penetración estándar, para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_u = 40 N A_p + 0.2 N A_s \quad \text{Ec 4.26}$$

Donde:

- Q_u = Capacidad de carga permisible, ton.
 A_p = Area de la sección transversal de la punta del pilote, m^2
 N = Número de golpes promedio a lo largo del fuste del pilote, Nº de golpes/30 cm.
 A_s = Area de la superficie lateral del fuste del pilote, m^2

La prueba de penetración estándar está sujeta a errores, por ello se acostumbra emplear un factor de seguridad mínimo de 4 para definir la capacidad de carga permisible, por lo que :

$$Q_a \leq Q_f / 4 \quad \text{Ec 4.27}$$

4.3.4 Capacidad de carga según la penetración estática con cono.

Para estimar la capacidad de carga en suelos granulares se puede utilizar los resultados de una prueba de penetración estática con cono holandés. La prueba tiene sus mejores resultados en suelos limosos y arenas de compactidad suelta a densa, la prueba no puede aplicarse en gravas gruesas ni arenas muy densas.

La capacidad de carga última de un pilote individual en un suelo granular se puede evaluar según Meyeroff, con la siguiente ecuación:

$$Q_u = q_c A_p + 2 f_s A_s \quad \text{Ec 4.28}$$

Donde:

- Q_u = Capacidad de carga última, ton.
 q_c = Resistencia promedio por punta de pruebas de cono, ton/m^2
 A_p = Area de la sección transversal de la punta del pilote, m^2
 f_s = Fricción lateral promedio, medida en la prueba de cono, ton/m^2
 A_s = Area lateral del fuste del pilote, m^2 .

Nota:

En pilotes de diámetro mayor de 50 cm es recomendable utilizar el valor mínimo de q_c en lugar del valor medio.

El factor de seguridad que se aplica a Q_u está comprendido entre 2.5 y 3 dependiendo del numero de pruebas que se realizaron y la variación en los resultados obtenidos. Se aplica el valor mínimo del factor de seguridad cuando la variación sea menor de $\pm 10\%$ del valor promedio.

4.3.5 Asentamiento en suelos friccionantes.

El cálculo del asentamiento de pilotes basado en propiedades elásticas del suelo y el material del pilote, resulta impreciso y de baja confiabilidad, por lo que la estimación de los asentamientos se lleva a cabo mediante métodos empíricos o basándose en pruebas de carga.

Método de Vesic.

Cuando se utilizan pilotes hincados con desplazamiento, el asentamiento se puede calcular para niveles de carga normales con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{B}{100} + \delta \quad \text{Ec 4.29}$$

Donde:

- S = Asentamiento de la cabeza del pilote, cm.
 B = Diámetro del pilote, cm.
 δ = Deformación elástica del pilote, en cm.

$$S = \frac{pBI}{2qc} \quad \text{Ec 4.33}$$

donde:

- qc = Resistencia promedio al cono estático, dentro del área de influencia del asentamiento.
 I = Factor de influencia de la penetración efectiva del grupo que está dado por:

$$I = 1 - \frac{D'}{8B} \quad \text{Ec 4.34}$$

donde:

- D' = Profundidad efectiva
 B = Ancho del grupo.

Asentamiento de grupos pilotes en arena.

La magnitud del asentamiento de un grupo de pilotes siempre resulta mayor que el de un pilote individual, esto es debido a la influencia del procedimiento de constructivo, el tamaño y geometría del grupo y la compacidad relativa inicial de la arena.

Skempton propuso el siguiente método:

$$S_g = \alpha_g S \quad \text{Ec 4.35}$$

Donde:

- S = Asentamiento del pilote individual, bajo carga permisible.
 α_g = Factor de asentamiento de grupo.

El factor α_g es función de las dimensiones del grupo y del espaciamiento entre pilotes, o de la relación B/D entre el ancho del grupo de los pilotes y el diámetro de los pilotes. Ver Tabla 4.5

B/D	1	5.0	10	20	40	60
α_g	1	3.5	5.0	7.5	10	12

TABLA 4.5 Factor de asentamiento de grupo α_g

En pilotes trabajando por punta y cuando esta se encuentre por debajo de un manto arcilloso o de limo consolidable, debe tomarse en cuenta el incremento de carga producido por la fricción negativa para el cálculo de los asentamientos, en el apartado 4.8. se menciona la forma de calcular la fricción negativa.

4.3.6 Asentamientos de pilotes colados in situ.

En este tipo de pilotes el asentamiento puede deberse a dos factores:

- Deformación del suelo cercano a la punta del pilote.
- Compresión del azolve depositado en el fondo de la excavación.

El segundo tipo debe evitarse controlando la excavación durante el proceso constructivo. El asentamiento debido a la deformación del suelo ocurre en forma inmediata, y puede calcularse con la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{\Sigma QL}{E_c A_p} + 1.57 \cdot \frac{\Sigma Q}{E_s \sqrt{A_p}} (1 - \nu^2) \quad \text{Ec 4.36}$$

Donde:

- δ = Asentamiento inmediato.
- ΣQ = Combinación más desfavorable de cargas (por pilote).
- L = Longitud de pilote.
- E_c = Módulo de elasticidad representativo del pilote, a largo plazo.
- A_b = Área de la sección transversal del pilote.
- E_s = Módulo de deformabilidad representativo del estrato de apoyo.
- ν = Relación de Poisson del estrato de apoyo.

4.4 PILOTES EN SUELOS COHESIVOS.

4.4.1 Capacidad de carga por fricción en arcillas.

Cuando se hince un pilote en arcilla saturada o limo plástico, la capacidad de carga se desarrolla por fricción lateral a lo largo del fuste del pilote.

Generalmente se evalúa la capacidad de carga en función de los esfuerzos totales, tomando como base la resistencia al corte no drenada, C_u , se han desarrollado correlaciones empíricas entre este parámetro y la resistencia por punta y fricción, sin que se haya demostrado totalmente su confiabilidad.

4.4.1.1 Capacidad de carga en arcillas con $C_u < 10 \text{ ton/cm}^2$

Un pilote hincado en arcilla con $C_u < 10 \text{ ton/cm}^2$ desarrolla su capacidad de carga casi totalmente de la adherencia. La capacidad de carga de un pilote hincado en una arcilla saturada homogénea será calculada con la Ecuación 4.36.

$$Q_s = \alpha C_u A_s \quad \text{Ec 4.37}$$

Donde:

- α = Factor de adherencia determinado de la figura 4.11 para distintas condiciones de hincado
- C_u = Resistencia al corte no drenada promedio a lo largo del fuste, ton/m^2
- A_s = Área lateral del fuste del pilote, m^2 .

La determinación de la adherencia depende de factores diversos, tales como:

- Tipo y consistencia del suelo.
- Tipo, proceso constructivo y material del pilote.
- Factor tiempo

Lo ideal es la determinación de la adherencia por medio de la realización de pruebas de carga sobre pilotes representativos, ya que es posible obtener valores confiables de adherencia, si la prueba permite determinar las componentes por punta y fricción de la resistencia total del pilote. Para pilotes instalados en arcilla se ha utilizado un método, que consiste en definir un factor de adherencia, α , que se determina como:

$$\alpha = \frac{C_a}{C_u} \quad \text{Ec 4.38}$$

Donde:

- α = Factor de adherencia.
 C_a = Adherencia.
 C_u = Resistencia al corte no drenada.

Generalmente este factor tiende a disminuir con la profundidad al aumentar la resistencia al corte, se han realizado diversos estudios para identificar la tendencia por medio de correlaciones entre α y C_u .

En publicaciones de 1981 Tomlinson presentó las gráficas de la *figura 4.11* y señala que son aplicables a pilotes que soportan cargas ligeras a moderadas, hincados hasta penetraciones relativamente superficiales del manto resistente. Los suelos que están por encima del manto resistente tienen una influencia considerable en el valor de la fricción lateral, como puede confirmarse de la observación de la *figura 4.11* en el caso 1 se obtienen valores altos de adherencia por efecto de arrastre de material granular, en el caso 2 el arrastre de arcilla blanda tiene un efecto debilitante sobre la fricción y en el caso 3 se forma una separación del suelo en la parte superior del pilote donde no se desarrolla fricción. A menor penetración y mayor firmeza de la arcilla, mayor será la incidencia de dicha separación.

Esfuerzos efectivos.

El otro criterio es utilizar esfuerzos efectivos, debido a que el hincado del pilote induce alteraciones de corte en el suelo que lo rodea provocando alteración y pérdida de resistencia, el fenómeno va acompañado de incremento en la presión de poro, que se disipa con el paso del tiempo, dando lugar a consolidación que ocasiona pérdida de agua y aumento de la capacidad de corte cerca del fuste del pilote.

En el caso de arcilla saturada, la fricción lateral se puede evaluar a partir de la resistencia al corte drenada suponiendo que la cohesión es nula. La fricción dependerá solo del ángulo de fricción efectiva ϕ' , entre la arcilla y el fuste. La capacidad de carga última puede calcularse con la ecuación:

$$Q_U = A_S (\tau_s)_P \quad \text{Ec 4.39}$$

Donde:

- A_S = Área lateral del fuste del pilote, m^2 .
 $(\tau_s)_P$ = Fricción lateral efectiva promedio a lo largo del fuste, ton/m^2 .

El valor promedio de τ_s se puede calcular a partir de valores de la fricción lateral suponiendo que:

$$\tau_s = P_0 K_0 \tan \phi' \quad \text{Ec 4.40}$$

Donde:

- P_0 = presión efectiva por sobrecarga a la profundidad considerada.
 K_0 = Coeficiente de empuje de tierras en reposo.
 ϕ' = Ángulo de fricción efectiva

Los valores de K_0 y ϕ' son difíciles de determinar, pero resultados de pruebas indican que para arcillas con $C_u < 10 \text{ ton/m}^2$, el factor $K_0 \tan \phi'$ varía entre 0.25 y 0.40. Puede utilizarse un valor medio de 0.30 por lo que la ecuación anterior queda como:

$$\tau_s = 0.30 P_0 \quad \text{Ec 4.41}$$

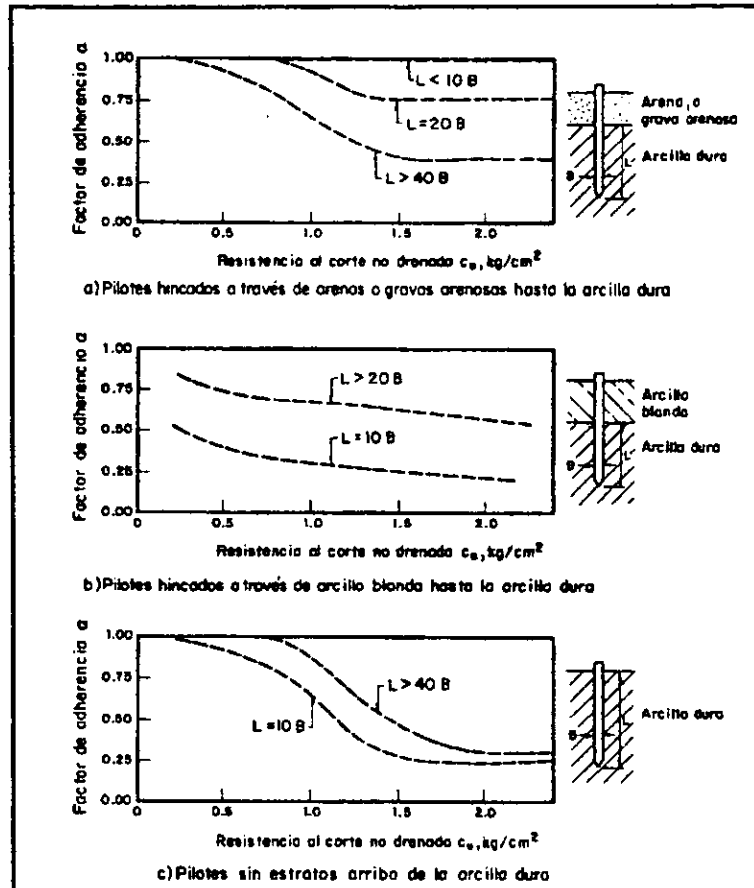


FIGURA 4.11 Factor de adherencia contra resistencia al corte.

NOTAS:

1. - Los gráficos no son aplicables a secciones H o en cruz ni a pilotes colados in situ, hincados o excavados.
2. - El factor de seguridad no deberá ser menor de 2.5 excepto para diseño basado en resultados confiables de pruebas de carga.

Las Normas Técnicas para Diseño de Cimentaciones presentan la ecuación 4.42 para calcular la capacidad de carga por adherencia de un pilote de fricción individual, bajo esfuerzos de compresión:

$$C_f = A_L f F_R \quad \text{Ec 4.42}$$

donde:

- F_R = 0.7 (1-s/2), factor de resistencia.
- s = relación entre los máximos de la sollicitación sísmica y la sollicitación total que actúan sobre el pilote.
- C_f = Capacidad por adherencia, ton.
- A_L = Área lateral del pilote, m².
- f = Adherencia lateral media pilote suelo, ton/m²

Para calcular la capacidad de adherencia de un grupo de pilotes, se puede utilizar también la ecuación anterior, considerando al grupo como pilas de diámetro igual a la envolvente del grupo.

Para comprobar la estabilidad de cimentaciones con pilotes de fricción, Las Normas Técnicas establecen que se verifique para la cimentación en su conjunto, para cada grupo de pilotes y para cada pilote individual, el cumplimiento de la siguiente desigualdad:

$$\Sigma Q F_c < R \quad \text{Ec 4.43}$$

Donde:

$\Sigma Q F_c$ = Suma de las acciones verticales a tomar en cuenta en la combinación considerada, afectadas por sus correspondientes factores de carga. Las acciones deben incluir el peso propio de la subestructura y los pilotes y el efecto de la fricción negativa que pudiera desarrollarse sobre el fuste o sobre su envolvente.

R = Capacidad de carga del sistema constituido por pilotes de fricción, mas losa o zapatas de cimentación, que se considera igual al mayor de los valores siguientes:

- Capacidad de carga del sistema suelo-zapatas o suelo-losa de cimentación despreciando el efecto de los pilotes. Si este es el valor que rige, las losas o zapatas deben diseñarse estructuralmente para soportar las presiones de contacto suelo-zapata o suelo losa, máximas calculadas, más la carga correspondiente a la capacidad de carga total del pilote dada por la ec 4. (que es la que se escribe adelante borrar) con $F_R = 1$.
- Capacidad de carga del sistema suelo-pilotes de fricción, que se considera igual a la suma de las capacidades de carga de punta de los pilotes individuales, mas el menor de los siguientes valores:
 1. Suma de capacidades de adherencia de pilotes individuales.
 2. Adherencia de una pila de geometría igual a la envolvente del conjunto de pilotes.
 3. Suma de capacidades de adherencia de diversos subgrupos de pilotes en que puede dividirse la cimentación.

4.4.1.2 Capacidad de carga en arcillas con $C_u > 10 \text{ ton/m}^2$.

Un pilote hincado en arcillas con resistencia al corte no drenada $C_u > 10 \text{ ton/m}^2$, deriva su capacidad de carga tanto de la adherencia lateral como de la resistencia por punta.

La fricción lateral de este tipo de pilote no puede determinarse confiablemente, debido al desconocimiento del efecto del hincado en la adherencia y sobre el área efectiva de contacto entre arcilla y pilote. Para un diseño preliminar, puede utilizarse la *figura 4.10*.

Para el diseño final es aconsejable realizar pruebas de carga.

4.4.2 Resistencia de pilotes por punta en suelos cohesivos.

Se acostumbra calcular la resistencia unitaria por punta en suelos cohesivos en términos de la resistencia al corte no drenada, C_u y del factor de capacidad de carga N_c con la siguiente expresión:

$$q_{bu} = C_u N_c \quad \text{Ec 4.44}$$

Donde :

- C_u = Cohesión del suelo, ton m^2 .
 N_c = Coeficiente de Capacidad de carga.

Para profundidades normales en pilotes, es apropiado un valor de $N_c=9$, pero se deben usar valores menores cuando la punta del pilote penetra una longitud pequeña en el manto firme. Puede interpolarse linealmente entre $N_c=6$ cuando la punta quede en la frontera del estrato firme y $N_c=9$ cuando la punta penetra 3 o más diámetros en dicho estrato.

En las Normas Técnicas para Diseño de Cimentaciones se presenta lo siguiente.

La capacidad de carga por punta de pilotes en suelos cohesivos se calcula según la expresión 4.45 como sigue:

$$C_p = (C_u N^*_c F_R + P_v) A_p \quad \text{Ec 4.45}$$

Donde

- C_p = Capacidad de carga por punta, ton.
- C_u = Cohesión aparente, determinada en ensaye triaxial UU, ton/m²
- P_v = Presión vertical efectiva total debida al peso del suelo a la profundidad de desplante de los pilotes, ton/m².
- A_p = Área transversal del pilote, m².
- N^*_c = Coeficiente de capacidad de carga definido en la tabla siguiente:

ϕ_u	0°	5°	10°
N^*_c	7	9	13

TABLA 4.6 Valores del coeficiente N^*_c .

Donde :

- ϕ_u = Ángulo de fricción aparente en grados.

La contribución del suelo bajo la losa de la subestructura y de la subpresión a la capacidad de carga de un sistema de cimentación a base de pilotes de punta deberá despreciarse en todos los casos.

4.4.3 Pilotes colados in situ en suelos cohesivos.

El proceso constructivo de este tipo de pilotes, induce alteración en las características del suelo perimetral.

La carga última basada en la adherencia entre la arcilla y el fuste del pilote, se obtiene con la ecuación:

$$Q_f = C_{ua} A_s \quad \text{Ec 4.46}$$

Donde:

- Q_f = Fricción lateral última.
- A_s = Área lateral del fuste del pilote.
- C_{ua} = Adherencia última, comúnmente $C_{ua} = 0.3$ a $0.4 C_u$

El valor de C_{ua} está afectado grandemente por el procedimiento de excavación que puede ocasionar el remoldeo y reblandecimiento de la arcilla. Se recomienda determinar C_{ua} a partir de la mínima resistencia al corte no drenado, C_u y limitada a un máximo de 10 ton/m².

La resistencia por punta se evalúa con la ecuación:

$$Q_p = N'_c C_u A_p \quad \text{Ec 4.47}$$

Donde:

- A_p = Área de la sección transversal de la punta del pilote.
- C_u = Valor mínimo de la resistencia al corte no drenada de la arcilla al nivel de

N'_c = desplante de la punta del pilote
 Coeficiente de capacidad de carga, función del diámetro del pilote, los valores se muestran en la tabla 4.7

Diámetro de la punta (m)	N'_c
$D < 0.5$	9
0.5 a 1	7
$D > 1.0$	6

TABLA 4.7 Coeficiente de capacidad de carga.

La carga permisible de este tipo de pilote se determina de la suma de la capacidad de carga por fricción y por punta, si el suelo bajo la base tiene una compresibilidad igual o mayor que la del suelo alrededor del fuste, se debe aplicar un factor de seguridad de 2.5 a la suma de $\Sigma(Q_f + Q_p)$

4.5 CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS DE CIMENTACIONES SOBRE PILOTES DE FRICCIÓN.

MÉTODO SIMPLIFICADO.

Al realizar la predicción de los asentamientos de estructuras cimentadas sobre pilotes de fricción se presentan dos problemas:

El cálculo de esfuerzos o deformaciones para cargas en el interior del semiespacio.
 Interacción suelo pilote, que es sensible a la relación esfuerzo-deformación-tiempo.

Aunque la primera parte del problema se soluciona mediante el uso de computadora, el segundo punto conduce a grandes incertidumbres. A continuación se presenta un método para el cálculo de hundimientos que se puede realizar a mano y que tiene un margen de error razonable. El presente método se calcula los incrementos de esfuerzo normal en el suelo y las correspondientes deformaciones, basándose en una transformación aproximada del problema de Mindlin a uno de Boussinesq equivalente.

A continuación se presenta un procedimiento simplificado para el cálculo de los asentamientos en pilotes trabajando a fricción, el procedimiento es similar al empleado para calcular el asentamiento debido a cargas aplicadas en la superficie y consta de los siguientes pasos:

1. Se debe considerar como una zona compresible la limitada por dos fronteras horizontales: la superior correspondiente al nivel neutro NN (el nivel neutro es aquel a partir del cual no existe desplazamiento relativo pilote-suelo por penetración del pilote) y la inferior a la máxima profundidad a que existan suelos compresibles. Calcular la profundidad del NN mediante tanteos que satisfaga la igualdad de la ecuación 4.48.

$$Q = C_p + F_{NN-PP}^+ \quad \text{Ec 4.48}$$

Donde:

Q = Carga total tomada por la cabeza del pilote, calculada como la diferencia entre la carga total actuante sobre el nivel de desplante y la carga de compensación.

C_p = Capacidad de carga total por punta de los pilotes.

F_{NN-PP}^+ = Fricción positiva total que puede desarrollarse entre la punta de los pilotes y el nivel NN, suponiendo que se desarrolla totalmente la adherencia suelo-pilote.

Los dos términos del segundo miembro se pueden considerar como el mínimo de los valores siguientes:

- La suma de los correspondientes de pilotes individuales.
- El conjunto de todos los pilotes.
- Suma de los correspondientes a grupos de pilotes.

2. Calcular los esfuerzos verticales en los puntos de interés como sigue:

a) Considerar aplicada a nivel medio de cada tramo i una presión uniforme P_i en toda el área piloteada y al nivel de la punta de los pilotes una presión uniforme P_p , en que:

$$P_i = \frac{F_i^+}{A} * I \quad \text{Ec 4.49}$$

$$P_p = \frac{C_p}{A} * I \quad \text{Ec 4.50}$$

Donde:

- F_i^+ = Fricción positiva en el tramo i del conjuntos de pilotes.
- I = Coeficiente de la tabla 4.8

Z/r	I
0	1.00
1	0.70
2	0.56
3	0.54
∞	0.50

TABLA 4.8 Valores de I para cálculo de esfuerzo.

Donde:

- z = Profundidad del plano de aplicación de la carga, medida desde la superficie
- r = $(A/\pi)^{1/2}$.

- b) Calcular el incremento de esfuerzo vertical en los puntos abajo del nivel de aplicación de carga mediante la solución de Boussinesq.
- c) Considerar aplicadas a las elevaciones de las cargas a descargas uniformes de valor d , al nivel medio de cada tramo del conjunto de pilotes y de valor d_p al nivel de las puntas en que :

$$d_i = \frac{F_i^+}{A} (1-I) \quad \text{Ec 4.51}$$

$$d_p = \frac{C_p}{A} (1-I) \quad \text{Ec 4.52}$$

d) Determinar los decrementos de esfuerzo vertical en puntos arriba de los niveles de aplicación de las descargas del inciso anterior, suponiendo que se distribuyen hacia arriba, según la distribución de Boussinesq.

- e) Calcúlense los incrementos netos de esfuerzo vertical como suma algebraica de incrementos y decrementos debidos a cargas de los distintos tramos en que se dividió la zona de fricción positiva y a la carga por punta.
3. Determinar los asentamientos bajo cualquier punto de la cimentación, sumando las deformaciones verticales en el suelo producidas por los incrementos de esfuerzos previamente calculados a lo largo de la vertical que pasa por el punto de interés. Dicha suma de deformaciones se hará entre NN y la máxima profundidad de suelos compresibles.

4.6 PILOTES EN ROCA.

Los pilotes apoyados o empotrados en roca son capaces de soportar grandes cargas; su construcción puede ser de dos tipos:

Pilotes colados en el sitio y pilotes hincados, de acero (secciones *H* y tubos obturados) o de concreto con punta de acero. En el primer caso se conoce el área de contacto con la roca y la capacidad de carga se evalúa con los métodos que se describen en el siguiente punto.

En el caso de pilotes hincados, de los tipos mencionados, surgen incertidumbres sobre la profundidad de penetración que puede alcanzarse y la calidad de la roca en el nivel de desplante.

La capacidad de carga en este caso debe estimarse a partir de observaciones durante el hincado, experiencia local y realización de pruebas de carga.

La selección del tipo de pilote y el diseño de su punta quedan regidos por las características de dureza y echado de la roca. Para reducir la presión entre el acero y la roca, generalmente a valores comprendidos entre 210 y 420 kg/cm², se utiliza un refuerzo en la punta agregando placas soldadas o remachadas. En la tabla 4.9 se presentan características de rocas usadas comúnmente como materiales de cimentación.

4.6.1 Asentamientos en roca.

El análisis de los asentamientos de pilotes que se encuentren empotrados o desplantados en roca, presenta un problema difícil e impreciso, debido al carácter discontinuo de la roca.

Los asentamientos elásticos en roca sana son generalmente muy pequeños y pueden considerarse como despreciables. Los asentamientos importantes en roca se deben a la presencia de capas intercaladas de material compresible y a juntas abiertas en la masa rocosa.

Cuando se prevea la ocurrencia de los asentamientos mencionados, deben evaluarse y tomarse en cuenta en el diseño.

En cimentaciones de estructuras importantes, de gran tamaño o que transmitan grandes cargas se hace necesario el cálculo de los asentamientos, en este caso es conveniente tomar en cuenta lo siguiente:

- Los asentamientos calculados a partir de módulos elásticos de núcleos de roca son poco confiables, debido a que no se considera el efecto de juntas y discontinuidades de la roca; para el cálculo se establecen hipótesis arbitrarias para considerar el efecto de las juntas y por tanto tiene poca confiabilidad.
- Los asentamientos calculados en base a pruebas de placa realizadas en el lugar, tienen la ventaja de considerar la influencia de las discontinuidades y la alteración de la roca, debe, sin embargo considerarse la importancia del factor de escala, por ello es importante que la

placa tenga el mismo diámetro que el pilote, esto rara vez se logra, generalmente se usan placas de menor diámetro. Deben usarse placas mayores que la mitad del diámetro del pilote y no deben ser menores de 30 cm.

- Las pruebas de carga de placa deben realizarse con exactitud, ya que los resultados son en ocasiones erróneos. Deben realizarse varias pruebas, con diferentes diámetros, para evaluar en forma confiable el comportamiento de la cimentación.

Las cimentaciones importantes en roca requieren de una exploración detallada del subsuelo que debe incluir lo siguiente:

- Determinación de las características estructurales, como estratificación, foliación, rumbo y hechado de los estratos.
- Presencia de discontinuidades, tales como juntas, fallas o canales de disolución en rocas sedimentarias y oquedades en rocas ígneas y extrusivas.

Debe tomarse en cuenta los siguientes conceptos en el diseño:

1. Las rocas sedimentarias laminadas, como la caliza y la arenisca, a menudo se encuentran en capas delgadas separadas por arcillas o lutitas blandas. La capacidad de carga de estos materiales depende en gran medida de las propiedades de la arcilla o las lutitas blandas y se hace necesaria la realización de muestreo inalterado para determinar sus características.
2. Algunas lutitas, limolitas y argilitas se reblandecen o expanden al entrar en contacto con el aire. Los materiales que contienen sulfatos en forma de piritas o anhidritas se pueden hidratar con gran expansión volumétrica. En estos casos se recomienda realizar ensayos en núcleos de rocas arcillosas sedimentarias, en pruebas de delesnamiento por inmersión en agua, si dicha tendencia al delesnamiento es pronunciada, se deben determinar las propiedades de expansión con pruebas de consolidación. Se requiere de impermeabilizar las excavaciones.
3. Las rocas calcáreas con cavemas de disolución constituyen un problema difícil de cimentación, por lo que se debe revisar la información geológica y de fotografía aérea para identificar evidencias de dolinas o formación de cavemas.

Se recomienda empotrar en la roca una longitud de 1 a 3 veces el diámetro del cimiento, dependiendo de las condiciones de empotramiento

4.6.2 Capacidad de carga

La capacidad de carga se determina siguiendo uno de los siguientes criterios:

- a) La capacidad de carga por Punta.- Esta hipótesis puede ser conservadora, sin embargo debe tenerse cuidado de limpiar el fondo de la excavación, ya que de lo contrario la resistencia por punta se desarrollará después de que ocurran asentamientos provocados por el desalojo o compresión del material azolvado en el fondo.
- b) La capacidad de carga por Adherencia entre concreto y roca.- En esta hipótesis la capacidad de carga depende en gran medida de la calidad de la superficie de la roca en la parte de contacto.
- c) Capacidad de carga por Punta / adherencia.- Esta hipótesis da valores altos y no debe utilizarse a menos que se tenga pleno conocimiento de las características del subsuelo y se verifique su aplicación por medio de suficientes pruebas de carga o a través de experiencia bien fundada.

4.6.2.1 Capacidad de carga por punta en roca.

Cuando se decide utilizar esta hipótesis, la capacidad de carga se calcula en función de la resistencia al corte de la roca con la siguiente ecuación:

$$Q_a = (q_u)_c * K_{sp} * d \quad \text{Ec 4.53}$$

En la que :

$$d = 0.8 + 0.2 \left(\frac{H_s}{B} \right) < 2 \quad \text{Ec 4.54}$$

Donde:

- Q_a Capacidad de carga permisible, ton/m².
 $(q_u)_c$ Resistencia a la compresión no confinada promedio del núcleo de roca, ton/m².
 K_{sp} Coeficiente empírico que depende del espaciamiento de las discontinuidades en roca. Ver tabla 4.10
 d Factor de profundidad.
 H_s Profundidad de empotramiento en la roca resistente, m.
 B Diámetro de la cavidad, m.

Debe considerarse que los valores del parámetro $(q_u)_c$ no son representativos de las propiedades mecánicas de la masa de roca, debido al efecto de la alteración inducido por el muestreo y a la falta de discontinuidades en los especímenes ensayados.

La carga permisible debe de compararse con la establecida en la tabla 4.11

4.6.2.2 Capacidad de carga por adherencia entre roca y concreto.

Cuando la carga se transmite por medio de las paredes del pilote, a través de la longitud empotrada en la roca, la capacidad de carga se determina con la expresión:

$$Q_a = \pi B H_s \tau_a \quad \text{Ec 4.55}$$

Donde:

- Q_a = Capacidad de carga por adherencia permisible, ton.
 B = Diámetro del pilote, m.
 H_s = Profundidad de empotramiento en la roca sana, m.
 τ_a = Resistencia permisible por adherencia entre concreto y roca, ton/m².

τ_a es función de la calidad de la superficie de contacto expuesta por la excavación varía entre 70 y 210 ton/m².

Espaciamiento de las discontinuidades	K_{sp}
Muy grande (> 3m en prom)	0.4
Grande (entre 1 y 3m en prom)	0.25
Moderadamente cerrado (entre 0.3 y 1 m en prom)	0.1

TABLA 4.10 Espaciamiento de discontinuidades.

ESTA TERCERA NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Tipo		Roca	Peso volumétrico seco típico Kg / m ³	Intervalo de variación del módulo de elasticidad, 10 ³ Kg/cm ²	Intervalo de variación de la resistencia a la compresión, Kg/cm ²	Características estructurales.
IGNEA:	Intrusiva, (de grano grueso)	Predomina feldespato, color claro: Granito (abunda cuarzo)	2691	281 a 492	703 a 1758	Generalmente se encuentran como intrusiones dentro de una gran masa. Pueden presentar un sistema de fracturamiento cerrado, excepto donde el intemperismo ha atacado de la superficie hacia abajo. Puede haber intemperismo localizado profundo en la intersección de sistemas principales de fracturamiento. En forma de cuerpos laminados caracterizados por extensos sistemas de juntas, más bien abiertas en basalto que en riolita y andesita. Puede tener cavidades, huecos, capas de ceniza volcánica o pómez como resultado de vulcanismo concurrente con la extrusión. Exhibe estructuras de flujo; puede ser muy vesicular. Estructura ligera y relativamente porosa formada por erupciones volcánicas.
		Diorita (poco cuarzo)	2820	351 a 562		
		Predomina hierro y magnesio Gabro	2884	492 a 844	1055 a 2109	
	Extrusiva (grano fino)	Predomina feldespato, color claro: Riolita (abunda cuarzo)	2595	351 a 562	703 a 1758	
		Andesita (poco cuarzo)	2659	422 a 633		
		Predomina hierro y magnesio Basalto	2852	492 a 914	1758 a 2812	
Obsidiana		2243	70 a 281	141 a 562		
	Toba	1602	14 a 70	14 a 70		
METAMORFICA	Foliada (laminada)	Esquisto micáceo (grano medio)	2675	141 a 351	351 a 1055	Muy plegada y distorsionada. Se presenta fracturamiento, reblandecimiento, intemperismo o erosión profunda en zonas de intenso movimiento. El intemperismo produce residuos micáceos arcillosos. Menos distorsión que en rocas muy foliadas. El residuo de la intemperización es rasposo con partículas resistentes de cuarzo. La cuarcita y el mármol pueden ser muy duros y con un sistemas de fracturas muy finas. Algunas serpentinas son blandas a gran profundidad.
		Pizarra oscura (grano fino)	2691	351 a 562	703 a 1406	
	Bandeada (foliación)	Gneis de grano grueso, con abundante cuarzo.	2707	281 a 562	703 a 1406	
	Masiva	Cuarcita (predomina cuarzo)	2659	422 a 562	1055 a 2461	
		Mármol (predomina calcita)	2691	492 a 703	844 a 2109	
		Serpentina relativamente blanda	2531	70 a 351	70 a 703	
SEDIMENTARIA	minerales de arcilla)	De grano fino, laminada: Lutita (tamaños de arcilla)	1602 a 2243	35 a 141	0.7 a 351	Gran variación de propiedades mecánicas de sus materiales, formadas por compactación o cementación. Las lutitas de compactación pueden reblandecerse, expandirse o desmoronarse al aire, los tipos de cementación no son susceptibles al intemperismo. Su resistencia y permeabilidad dependen del tipo y grado de cementación. El fracturamiento, plegamiento y junteo dan lugar al deterioro de los materiales cementantes: En la caliza se pueden formar grandes cavidades y canales de disolución en fracturas y sistemas de juntas. La dolomía, que puede recristalizarse a partir de la caliza y es menos soluble.
		Limolita	1762 a 2403	35 a 141	0.7 a 351	
	Silíceas (predomina sílice)	Conglomerado (grano grueso)	2483	70 a 351	351 a 1055	
		Brecha (grao grueso)	2531	70 a 351	351 a 1055	
	Calcaréa (Predomin a carbonato de calcio)	Arenisca grano medio	2355	70 a 211	281 a 844	
		Grano fino o cristalino fino: Caliza (algo estratificada)	2643	141 a 422	351 a 1055	
	Dolomía	2675	281 a 562	492 a 1406		

NOTA Los valores de propiedades corresponden a especímenes sanos, no intemperizados, sin huecos ni fracturas ensayados en el laboratorio. La elasticidad y la resistencia dependen de la porosidad y la textura. La elasticidad y resistencia de especímenes saturados ensayados son generalmente del 80 al 90% de los valores anotados. Los valores para lutita y limolita no incluyen materiales que no son esencialmente arcillas duras, que no se pueden muestrear con equipo ordinario de muestreo de suelos.

TABLA 4.9 Propiedades de distintas rocas.

4.7 GRUPOS DE PILOTES.

Ya se ha mencionado la influencia del procedimiento constructivo en el estado inicial de esfuerzos (relajación, cambio de presión de poro, etc), cuando se forman grupos de pilotes cercanamente espaciados estas alteraciones se acentúan. Esta adición de efectos se observa también cuando el pilote transmite la carga al subsuelo, es decir se da una superposición de los esfuerzos transmitidos, creándose "bulbos de presiones" que son mayores a los que se forman en pilotes individuales, esto se debe a que con la proximidad de pilotes en un grupo los distintos bulbos se combinan y forman un bulbo de tamaño mayor, como se muestra en la *figura 4.12*.

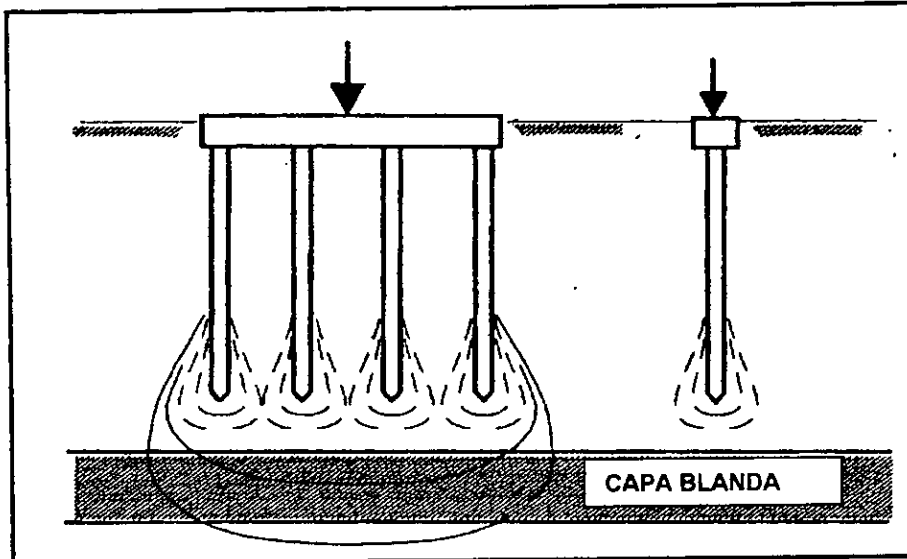


FIGURA 4.12 Superposición de bulbos de presión en grupos de pilotes.

Los efectos anteriormente descritos son causantes de que en general la capacidad de carga de un grupo de pilotes no sea igual a la suma de las capacidades de los pilotes individuales y que el asentamiento tampoco sea el mismo. Solo cuando se apoyan en estratos rocosos incompresibles el asentamiento del grupo corresponde al de un pilote individual.

Se puede mencionar que los problemas de estabilidad de los grupos de pilotes son dos:

- Capacidad de carga del suelo alrededor y debajo del grupo.
- Efectos de consolidación en una profundidad considerable.

4.7.1 Espaciamiento.

Es necesario determinar espaciamientos óptimos para minimizar los efectos de instalación y evitar espaciamientos que resulten antieconómicos. Las recomendaciones para el espaciamiento son varias, Teng presenta algunas en la *Tabla 4.12* que son compatibles con algunos Reglamentos de Construcción:

Tipo de pilote	Espaciamiento mínimo, centro a centro de pilotes d =diámetro en la punta
Pilotes de punta sobre estratos duros	2 a 2.5d o 75cm
Pilotes de punta sobre roca dura	2d o 60cm
Pilotes de fricción	3 a 5d o 105cm

TABLA 4.12 Espaciamiento mínimo de pilotes.

El propósito de estos espaciamentos es minimizar el costo de la estructura cabezal del grupo y son útiles en el predimensionamiento, no deben utilizarse como reglas establecidas o inviolables.

Crespo recomienda que dicha separación se encuentre entre 2.5 a $4d$, donde d es el diámetro superior del pilote. Espaciamentos menores a 2.5 crean dificultades en el hincado y un espaciamento mayor a $4d$ aumenta el costo de la zapata-cabezal y no se obtiene mayor beneficio.

Elegida la distancia entre pilotes, estos se disponen en hileras, formando cuadros o a tresbolillo, como se muestra en la *Figura 4.13* y se calcula el área de cada zapata cabezal. Si el área de cada zapata cabezal es mucho menor que la mitad del área cubierta por la estructura, los pilotes se dividen en grupos con zapatas comunes, pero si el área de zapatas-cabezales es mucho mayor que la mitad del área ocupada por la estructura, se proyecta una platea soportada por un solo grupo de pilotes. Si la distribución de cargas actuantes es muy variable, la distancia entre pilotes se ajusta en cada parte a dicha intensidad de cargas.

La distancia de pilotes perimetrales se considera igual a $D/2$.

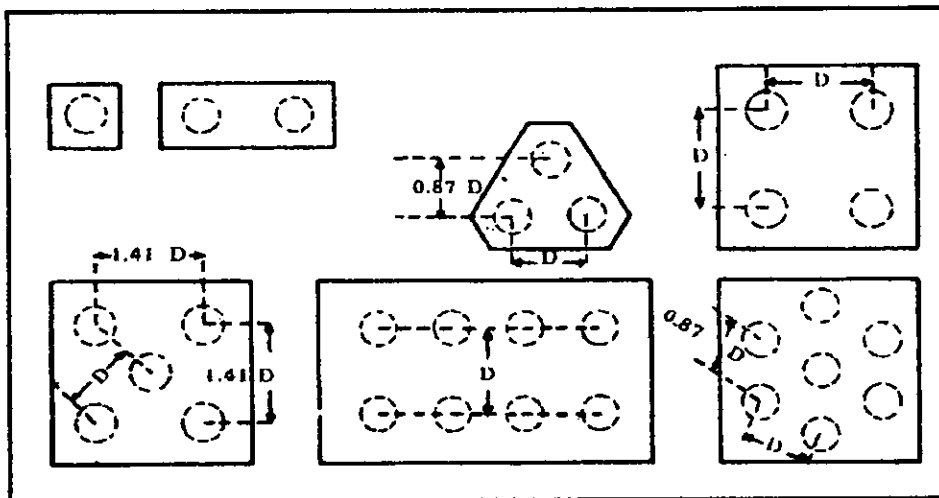


FIGURA 4.13 Arreglos de pilotes.

4.7.2 Capacidad de carga de grupos de pilotes.

La experiencia muestra que un grupo de pilotes de fricción puede fallar como una unidad, hundiéndose en el terreno, antes que la carga por pilote alcance el valor de carga admisible. En la *Figura 4.14* se muestra la forma de falla de un grupo de pilotes.

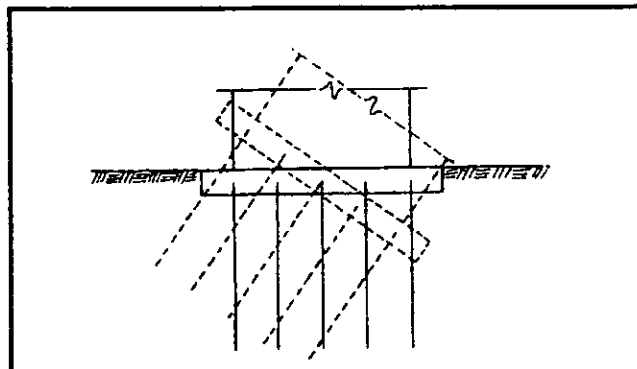


FIGURA 4.14 Forma de falla de un grupo de pilotes.

Terzaghi y Peck propusieron el siguiente método para analizar la capacidad de carga de un grupo de pilotes, en el que se supone:

1. El cabezal es perfectamente rígido.
2. El suelo contenido dentro de un prisma periférico al grupo se comporta como un bloque rígido

Por lo tanto el bloque completo puede calcularse como una cimentación profunda desplantada al nivel de la punta. La capacidad de carga se evalúa con:

$$Q_g = spD + q_u A \quad \text{Ec 4.56}$$

Donde:

- Q_g = Capacidad de carga del grupo.
 s = Resistencia cortante promedio a lo largo de la superficie lateral del bloque.
 D = Longitud embebida de los pilotes en el suelo.
 p = Perímetro del área que encierra los pilotes del grupo.
 q_u = Capacidad de carga última del suelo al nivel de la punta.
 A = Área que encierra los pilotes del grupo.

Para pilotes de fricción hincados en suelos cohesivos saturados y con forma rectangular de dimensiones $B \times L$ la ecuación anterior queda como:

$$Q_G = c_u N_c A + 2D (B + L) c_{um} \quad \text{Ec 4.57}$$

Donde:

- c_u = Resistencia al corte no drenada en la base del grupo, promediada en la altura vinculada al mecanismo de falla en la base
 N_c = Coeficiente de capacidad de carga de Skempton para el término de cohesión.
 c_{um} = Resistencia al corte no drenada promedio a lo largo de D .

Si la capacidad de grupo Q_G es menor que nQ , se tomará Q_G . Esto indica que el espaciamiento es muy pequeño, por otro lado con un espaciamiento mayor Q_G es mayor que nQ , en ese caso rige nQ .

Terzaghi y Peck consideran que un grupo de pilotes no fallará cuando la carga de proyecto sea menor que $Q_G/3$. Si esta condición no se cumple, debe cambiarse el proyecto, aumentado el largo del pilote, cambiando las dimensiones del mismo o ambas.

4.7.3 Asentamiento de grupos de pilotes en suelos granulares

Los asentamientos en suelos granulares, tiene una naturaleza que puede resumirse en los siguientes puntos:

- Carácter inmediato del asentamiento significativo.
- Incidencia de los efectos posteriores a la construcción, como cargas fluctuantes o vibratorias.
- Dificultades en obtención de características.

El método propuesto por Skempton fue tratado en el inciso 4.3.5. Meyerhof propuso la siguiente expresión para determinar el asentamiento inmediato en grupos de pilotes en arenas y gravas saturadas:

$$S_G (\text{mm}) = 92 q \sqrt{B} \left[\frac{I}{N} \right] \quad \text{Ec 4.58}$$

Donde:

- q = Presión neta de la cimentación, kg/cm
 B = Ancho del grupo, m
 L = Largo del grupo, m
 N = Número promedio de golpes de sondeo de penetración estándar en el espesor que se asienta, aproximadamente un ancho de grupo B .
 I = Factor de influencia por longitud embebida de los pilotes del grupo, se calcula con la siguiente expresión.

$$I = \left[1 - \frac{D}{8B} \right] \geq 0.5 \quad \text{Ec 4.59}$$

Donde:

- D = Longitud empotrada de los pilotes, m.

Para grupos en arena limosa Meyerhof recomienda duplicar el valor obtenido en la ecuación anterior.

También se puede relacionar el asentamiento en suelos granulares con el resultado de penetración con cono estático, con la *Ecuación 4.60*.

$$S_G = \frac{qBI}{2q_C} \quad \text{Ec 4.60}$$

Donde:

- q_C = Resistencia de punta promedio del cono estático en el espesor de suelo que se asienta.

Todas las variables deben ir en unidades consistentes.

4.7.4 Asentamiento de grupos de pilotes en suelos cohesivos.

Los asentamientos de grupos de pilotes en este tipo de suelos se deben al asentamiento inmediato debido a la aplicación de carga, generalmente despreciables y a los asentamientos por consolidación debido a cargas permanentes.

En el método propuesto por Terzaghi y Peck consiste en suponer que la carga soportada por el grupo se transfiere al suelo a partir del tercio inferior de los pilotes en forma de una pirámide de lados inclinados 30° , como se muestra en la *figura 4.15*, de forma tal que el esfuerzo en cierto nivel es igual a la carga dividida entre el área de la sección transversal de la base de la pirámide a dicho nivel.

El asentamiento se puede evaluar con la siguiente expresión:

$$\Delta H = H \frac{C_c}{1+e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \quad \text{Ec 4.61}$$

Donde:

- ΔH = Asentamiento, cm.
 C_c = Índice de compresibilidad, igual al cambio en la relación de vacíos para un ciclo logarítmico de esfuerzo aplicado, en la curva e -log σ_v .
 ΔP = Incremento de la presión efectiva. Kg/cm²
 e_0 = Relación de vacíos inicial.

H = Espesor del estrato compresible, medido a partir del tercio interior de los pilotes, cm
 P₀ = Presión inicial efectiva.

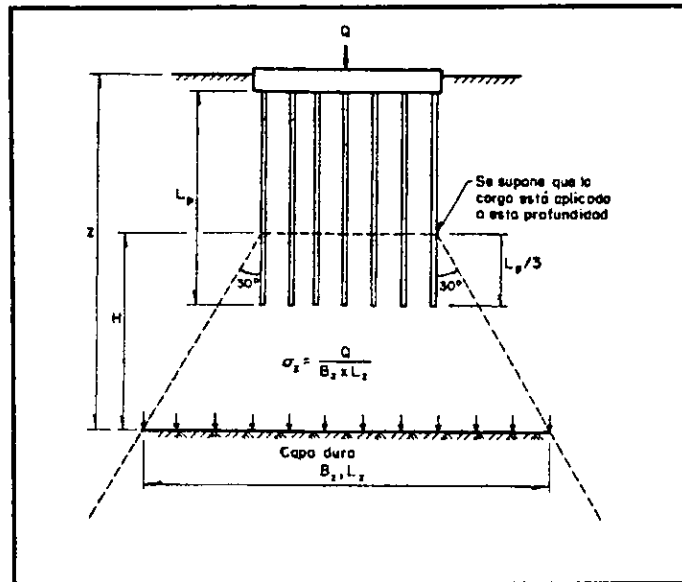


FIGURA 4.15 Distribución de esfuerzos bajo un grupo de pilotes de fricción en arcilla.

La ecuación anterior solo considera los efectos por consolidación primaria.

4.8 Fricción negativa.

En suelos cohesivos que sufren asentamientos debidos a explotación excesiva de mantos freáticos y procesos de consolidación se presenta este fenómeno, llamado fricción negativa. Este fenómeno consistente en que al disminuir el espesor del estrato arcilloso, debido a la adherencia entre el suelo-pilote, el pilote sufre una sobrecarga debida a esta adherencia. El fenómeno de la fricción negativa se presenta comúnmente en pilotes de punta, cuando por encima del estrato de apoyo se encuentra un estrato compresible. Este exceso de carga debe de considerarse en el proceso de diseño ya que la fricción negativa disminuye la capacidad de carga del pilote. Ver figura 4.16.

En pilotes de fricción la fricción negativa da lugar a la aparición de dos zonas con fricción de diferente signo. El diseño de este tipo debe considerar que los pilotes penetran en el estrato compresible a la misma velocidad que el llamado nivel neutro que separa ambas zonas y en el que no existe desplazamiento relativo suelo pilote. La forma de determinar el nivel neutro ha sido expuesta en el inciso 4.5. Ver figura 4.16.

El método más común para el cálculo de la fricción negativa τ_n , en este se supone que para suelos cohesivos:

$$\tau_n = \alpha C_u \quad \text{Ec 4.62}$$

Donde:

α = Factor de adherencia.
 C_u = Resistencia al corte no drenada.

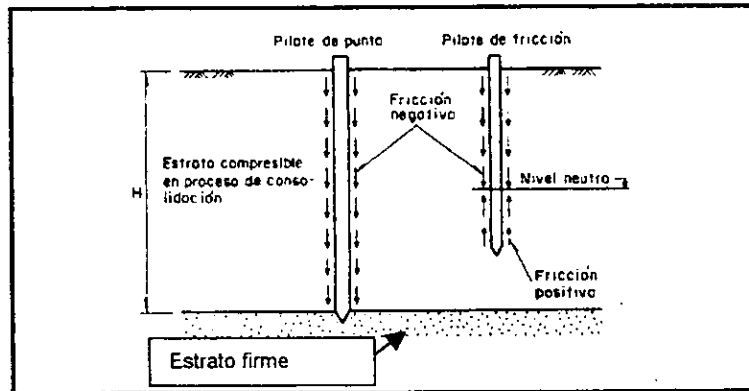


Figura 4.16 fricción negativa en pilotes.

De la observación de pilotes instrumentados se deduce, que la magnitud de la fricción negativa, se puede expresar en función del esfuerzo efectivo, de la siguiente forma:

$$\tau_n = P_o K \tan \phi' \quad \text{Ec 4.63}$$

Donde:

- P_o = Presión efectiva por sobrecarga incluyendo esfuerzo debido a la parte consolidada del terreno.
- K = Coeficiente de empuje de tierras, igual o mayor que K_o .
- ϕ' = Ángulo de fricción negativa en arcilla.

En suelos granulares la fricción negativa puede expresarse como:

$$\tau_n = \frac{1 - \text{sen}^2 \phi}{1 + \text{sen}^2 \phi} \tan \phi \sigma_z \quad \text{Ec 4.64}$$

Donde:

- ϕ = Ángulo de fricción interna del material.
- σ_z = Esfuerzo efectivo del material a la profundidad z .

En pilotes aislados la fuerza total debida a la fricción negativa se calcula como:

$$F_n = \tau_n A_s \quad \text{Ec 4.65}$$

Donde:

- A_s = Área del pilote en contacto con la capa de arcilla en proceso de consolidación.

En grupos de pilotes la fuerza máxima F_n sobre un pilote está limitada por el peso de la arcilla entre los pilotes y se evalúa con la ecuación:

$$F_n = \tau_n A_s \leq S^2 H \gamma \quad \text{Ec 4.66}$$

Donde:

- S_p = Espaciamiento de pilotes.
- H = Espesor del estrato de arcilla.
- γ = Peso volumétrico de la arcilla.

CAPITULO V.

CONSTRUCCIÓN Y ESPECIFICACIONES

CAPÍTULO V. CONSTRUCCIÓN Y ESPECIFICACIONES.

En el presente capítulo se describen los principales procesos constructivos de pilotes, así como las recomendaciones que se utilizan en México para cada tipo de proceso constructivo. Los procesos y recomendaciones deben ser tales que satisfagan los requisitos de calidad, seguridad y economía. Por motivos de espacio los procedimientos constructivos que se mencionarán serán los de pilotes colados en sitio y pilotes hincados.

Debe tenerse presente la importancia y la influencia, primero, de una selección adecuada del tipo de procedimiento constructivo y segundo de la adecuada realización de dicho procedimiento, en la calidad final del producto terminado, en este caso pilotes. De igual manera deben estudiarse las diferentes formas en que el proceso constructivo influye en el desarrollo de la resistencia de los diversos tipos de pilotes.

5.1 PILOTES HINCADOS.

El hincado se realizará con el equipo descrito en el capítulo III del presente trabajo. Dentro de esta clase de pilotes se puede distinguir dos tipos, los pilotes de concreto prefabricados (reforzados o preesforzados) y pilotes de secciones de acero y tubo hueco (cerrado o abierto). A continuación se describe brevemente las características de los procesos constructivos de cada uno de ellos.

5.1.1 PILOTES DE CONCRETO PREFABRICADOS.

5.1.1.1 Fabricación.

En la fabricación de los pilotes de concreto se debe establecer requisitos mínimos y procedimientos de construcción adecuados. Entre los que destacan los siguientes aspectos:

a) Camas de colado.

Son plataformas de concreto de 5 a 10 cm de espesor coladas sobre una base de material compactado. Estas sirven de apoyo a los moldes para la fabricación de pilotes, deben de contar con aditamentos de madera o metal para fijar el molde.

b) Moldes.

Los moldes son utensilios que reciben y dan forma al concreto del pilote, pueden ser metálicos, de plástico, madera o cualquier material que cuente con una rigidez capaz de evitar la deformación provocada por la presión del concreto, el vibrado del mismo y las maniobras de vaciado y acabado del pilote.

Los moldes deben limpiarse perfectamente antes de volver a usarse. La parte inferior del molde recibirá una capa de aceite mineral u otro material semejante, esto con la finalidad de que el pilote no se pegue al molde y se dañe.

Los moldes más comunes y de fácil manejo son los utilizados para pilotes cuadrados. Es usual realizar el colado en forma tal que los mismos pilotes ya colados sirvan como cimbra a los pilotes que se coloran después, como se muestra en la *figura 5.1*.

c) Acero de refuerzo.

Este deberá de cumplir con las normas establecidas en el capítulo II, en cuanto a sus características químicas y físicas. Deberá ser de grado estructural ($f_y = 4200$ o más) y se

debe verificar que las varillas se encuentren libres de óxido, aceites u otras sustancias antes de colocarlo. Deberá verificarse que el acero de refuerzo cumpla con lo especificado en las Normas aplicables en cuanto a:

1. Traslapes.
2. Ganchos y dobleces.
3. Espaciamiento entre varillas.
4. Recubrimientos.

Es importante revisar que al habilitar y armar el acero de refuerzo se satisfaga lo estipulado en planos de construcción y normas. Debe colocarse separadores, silletas de varilla o bloques de concreto entre el armado y la cimbra para cumplir con los recubrimientos especificados. Los elementos de izaje, llamados "orejas" se incluyen en el acero de refuerzo y deben indicarse en los planos constructivos, así como sus dimensiones y ubicación en el pilote.

En cuanto al manejo y la colocación deberá preverse, colocando, además del acero necesario estructuralmente, acero adicional para evitar deformaciones, movimientos o desplazamientos.

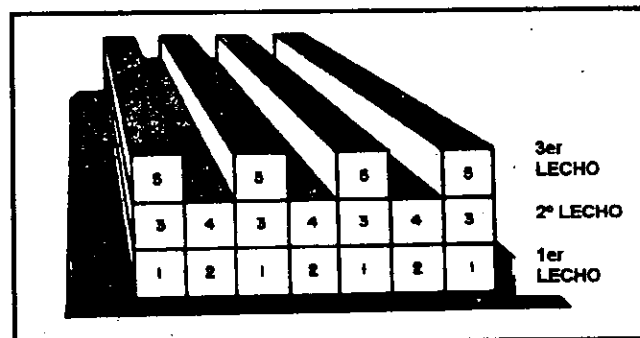


FIGURA 5.1 Secuencia de colado en pilotes prefabricados de concreto.

d) Concreto.

Los materiales que integran el concreto deberán satisfacer lo estipulado en el Capítulo II, además de revisar lo que las normas correspondientes establezcan en cuanto a características de agua, agregados y cemento. Se recomienda utilizar revenimientos reducidos al mínimo compatible con el procedimiento de colocación, estos van de 0 a 7.5 cm.

Para pilotes de concreto en contacto con agua dulce o aire se puede utilizar cemento portland tipo I, II, III o IV, en ambiente marino se recomienda cemento portland del tipo II o cemento puzolánico. Se recomienda, además, el uso de inclusores de aire en ambiente salino.

Para una mayor durabilidad es recomendable que la dosificación del concreto contenga al menos 336 kg de cemento por metro cúbico de concreto, en ambientes más agresivos se recomiendan dosificaciones con 420 kg de cemento.

Se recomienda utilizar resistencias del concreto de 300 kg/cm² en suelos blandos y de 350 kg/cm² en suelos medios a duros. Se deberá realizar una serie de pruebas por lo menos cada 15 m³ de concreto colocado y no menos de dos especímenes individuales en cada prueba.

e) Colado y curado.

El colado debe hacerse en forma continua, utilizando vibradores de concreto, para garantizar la homogeneidad del mismo y poder dar un acabado fino sin tener variaciones importantes en las medidas del pilote.

Una vez terminado el colado y después del fraguado inicial, el pilote debe ser curado manteniendo sus superficies con humedad o aplicando membranas de curado.

f) Descimbrado.

El descimbrado de los pilotes se realiza cuando el concreto ha adquirido la suficiente resistencia para evitar daños a la superficie del pilote, al retirar las cimbras debe aplicarse fraguador a las caras descubiertas por la cimbra. El residente debe colocar a cada pilote un número de identificación, para llevar un buen control de secuencias y fechas de colado, registrando éstas en el Reporte de hincado de pilotes.

5.1.1.2 Manejo de los pilotes.

El despegue de pilotes se realiza cuando el concreto ha adquirido un mínimo del 75% de su resistencia. Para evitar fracturas o daños de los elementos colados, los maniobristas deben colocar estrobos de acero en las "orejas" colocadas en puntos específicos del pilote. En la figura 5.2 se muestra la disposición común de los puntos para el izaje.

Todos los pilotes que durante su manejo sufran agrietamientos, hasta el punto de indicar que su refuerzo tiene deformaciones, deberán rechazarse.

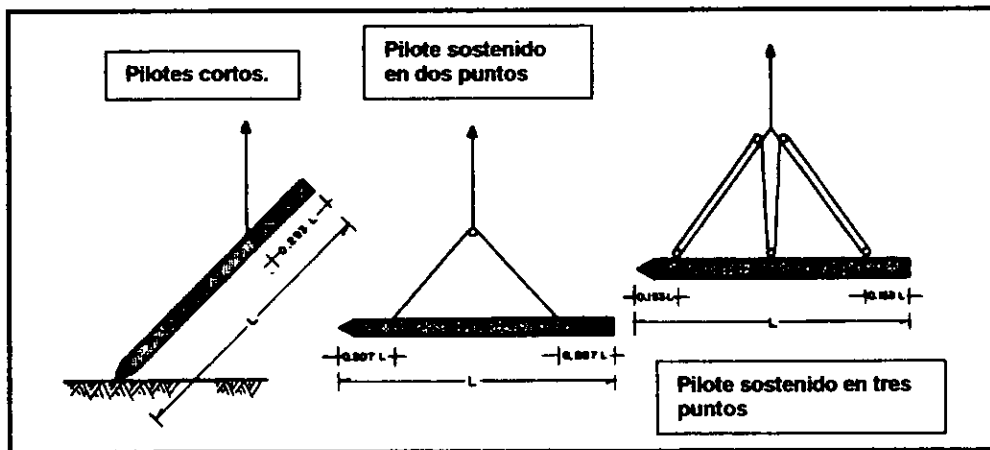


FIGURA 5.2 Puntos de izaje comúnmente usados.

El almacenamiento debe ser preferentemente en lugares cercanos a los puntos del hincado. Deben colocarse calzas de madera a $0.207L$, a partir de los extremos del pilote, aunque comúnmente se colocan a un cuarto de la longitud total del pilote. Dependiendo de la longitud del elemento se colocan dos o más calzas de madera, se apilan los pilotes en no más de cuatro camas. En la figura 5.3 se muestra la forma adecuada de estibar los pilotes precolados.

5.1.1.2 Juntas .

En ocasiones es necesario hincar varios tramos de pilotes, para lo cual es necesario utilizar una junta, estas se han diseñado en varios tipos, algunas consisten en tornillos placas soldadas y otros tipos. En la figura 5.4 se muestran algunos tipos de juntas.

Si la unión es a base de placas, éstas deben de tener las mismas dimensiones que la sección del pilote y sus características deben especificarse en los planos estructurales correspondientes y en el formato de Reporte de hincado pilotes.

Las placas con sus anclas van unidas por medio de alambra al acero de refuerzo del pilote y quedan formando parte del pilote durante el colado. La junta debe quedar perfectamente nivelada para evitar problemas en el proceso de soldadura durante el hincado. Las juntas deben tener por lo menos la misma resistencia a compresión, tensión y fuerza cortante que la sección del pilote.

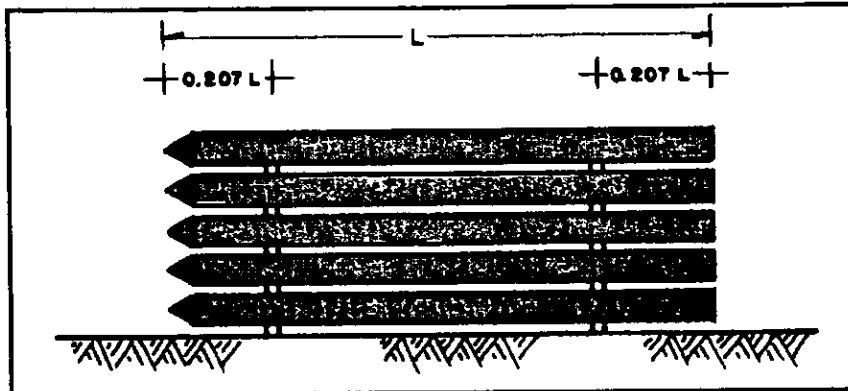


FIGURA 5.3 Estibamiento de pilotes

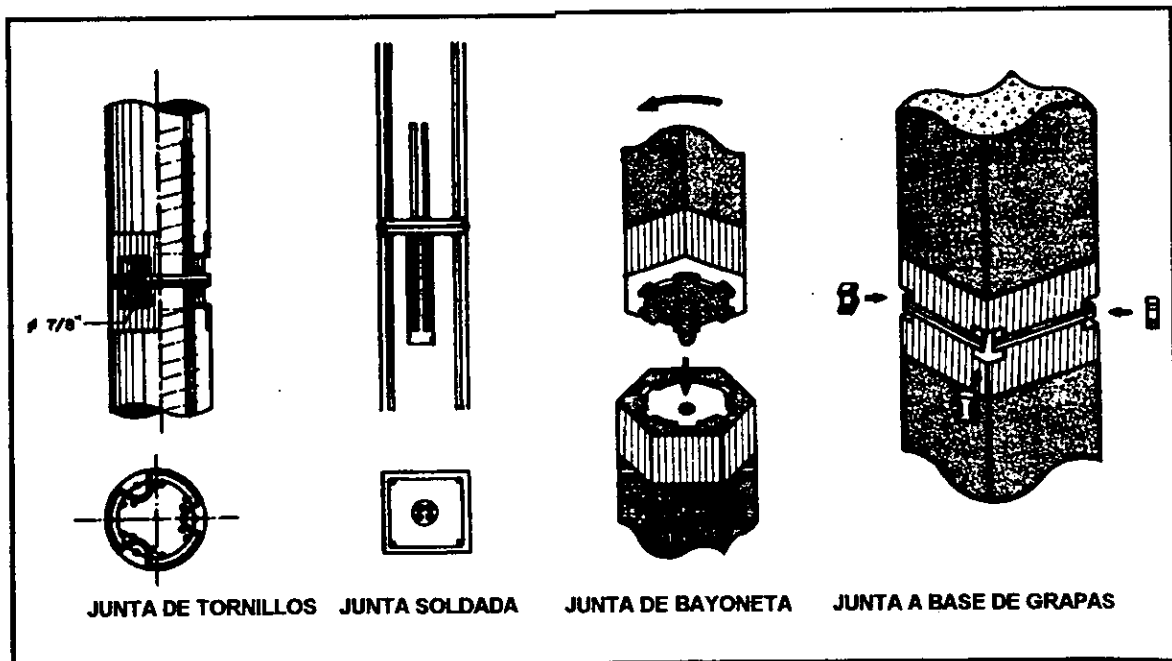


FIGURA 5.4 Diferentes tipos de juntas.

Procedimiento de soldadura de placas de pilotes.

El procedimiento para unir placas de dos secciones de un pilote mediante soldadura E-70xx se integra de los siguientes pasos:

- a) Se lanza la punta del pilote a la perforación guía y se procede a hincar esta sección del pilote hasta una altura de entre 0.50 y 0.80 cm sobre el nivel del terreno natural,

- de tal forma que permita la aplicación de la soldadura en las dos secciones del pilote.
- Se coloca la cabeza del pilote sobre la placa de la primera sección, cuidando el centrado entre placas y la verticalidad del pilote.
 - Se puentea las aristas de las placas con aproximadamente 3.0 cm de soldadura 7018 de diámetro 5/32, para evitar que se muevan dichas placas y permitan la aplicación de la soldadura de unión.
 - Se debe limpiar con cepillo de alambre la unión de las caras de la placa.
 - Se aplica el primer cordón de soldadura en la unión de las dos placas con la soldadura ya mencionada.
 - El procedimiento se realiza en las siguientes uniones en el sentido que se indica en la siguiente figura para aplicar los primeros cordones de soldadura.

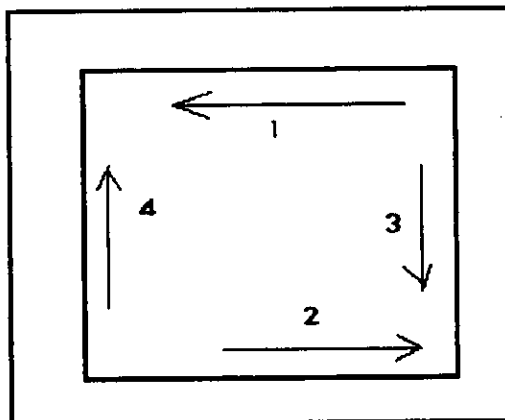


FIGURA 5.5 Secuencia de soldado de los primeros cordones.

- La aplicación del segundo cordón se lleva a cabo en la parte baja de la placa de la primer sección y el primer cordón, es decir se aplican cordones en paralelo.
- Se repiten los pasos f y g en forma secuencial.
- El tercer cordón se aplica sobre los cordones 1 y 2 y la placa de la segunda sección.

5.1.1.2 Pilotes de concreto presforzados.

En este tipo de pilotes se utiliza el preesfuerzo, para hacer más ligero el pilote y en consecuencia consumir una menor cantidad de acero de refuerzo en operaciones de manejo. Generalmente se utilizan secciones "H" y su forma de transmitir la carga es por fricción.

Los moldes deben ser metálicos y deben limpiarse perfectamente antes de volverse a utilizar. Antes del colado la parte inferior del molde deberá recubrirse con aceite mineral o un material de características similares.

Las camas con longitudes de hasta 100 m. deben ser metálicas y estar ancladas al piso, asegurando una posición permanente que sirve de referencia para fijar los puntos de tensado en ambos lados de la cama. La altura de la cama debe permitir al trabajador ejecutar

el armado y colado del pilote en condiciones cómodas, como se muestra en la *figura 5.6*. La desviación máxima permitida del pilote podrá ser de 2 mm/ml.

Se utiliza para el preesfuerzo un cable de 5 mm de diámetro tanto para el armado longitudinal como transversal. Al cable del sentido longitudinal se le aplican cargas de 1.5 ton con un gato hidráulico de pistón hueco, una vez alcanzada la presión, se fija el cable a las estructuras colocadas en los extremos de la cama de colado.

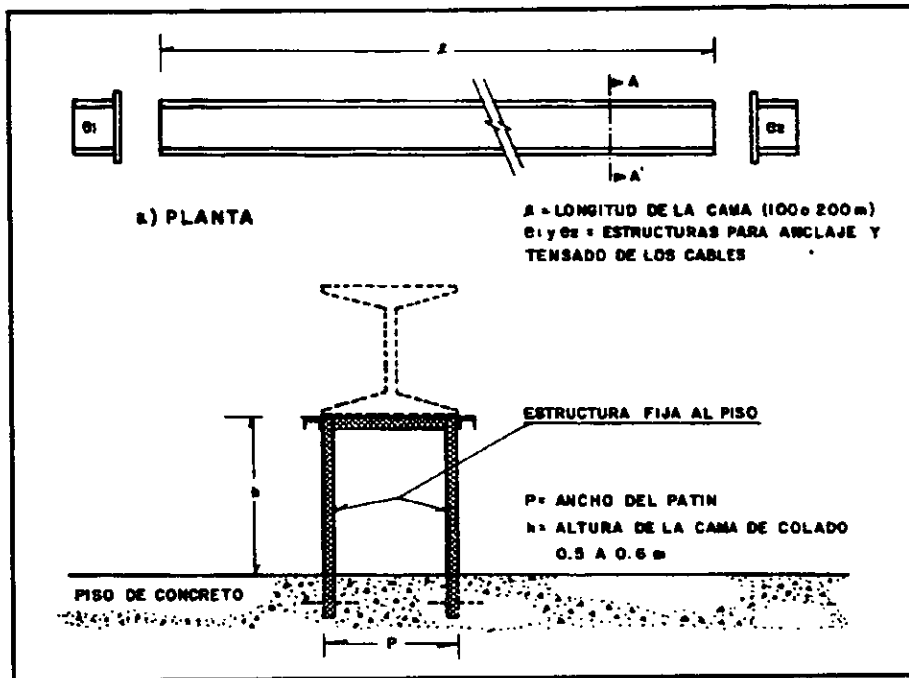


FIGURA 5.6 Cama para tensado y colado de pilotes presfuerzados.

El colado debe ser continuo, en una sola operación, se utiliza un concreto con revenimiento máximo de 6 cm, la preparación del concreto, el vaciado y vibrado deben ser por medios mecánicos, debe tenerse cuidado de no utilizar agregados de gran tamaño, debido a lo esbelto de las secciones del pilote. Se utiliza concreto con resistencia a la compresión $f'c$ del orden de 250 kg/cm^2

Todas las superficies deben quedar perfectamente lisas, la sección no debe tener entrantes, salientes u oquedades, en caso de que el pilote presente alguno de los defectos anteriores o algún otro causado por el descimbrado o manejo, se resanarán con resina epóxica.

El curado se realiza generalmente con vapor, dos horas después de terminado el colado, manteniendo una temperatura de 60° durante 8 horas, al término de este lapso se suspende el vapor y se deja reposar 2 horas. Durante el proceso de enfriado debe aplicarse lechada a la superficie del patín superior, para tapar las grietas transversales causadas por la contracción del concreto.

Debido a la esbeltez y ligereza del pilote no es recomendable entongarlos en camas con alturas mayores a 5 o 6 elementos, una mayor altura podría provocar fisuras o despostillamiento de patines.

5.1.1.2 Pilotes de acero.

Este tipo de pilotes se usan cuando las condiciones de hincado son violentas, se necesitan longitudes poco usuales o se requiere elevadas cargas de trabajo por pilote.

Estos pilotes pueden ser de perfil estructural "H" o "I" o tubulares de extremo inferior abierto o cerrado.

Los perfiles de acero en H penetran fácilmente en el terreno, debido al poco volumen de suelo que desplazan. El peralte de los perfiles estructurales varía entre los 15 y 30 cm. En los tubulares los diámetros son de hasta 60 cm. Las dimensiones dependen de la magnitud de cargas por transmitir, y disponibilidad de material y equipo para hincado.

Debido a que este tipo de pilotes se hincan en grandes longitudes, generalmente se hace necesario soldar nuevos tramos, la soldadura se realiza en "Z", como se muestra en la figura 5.7.

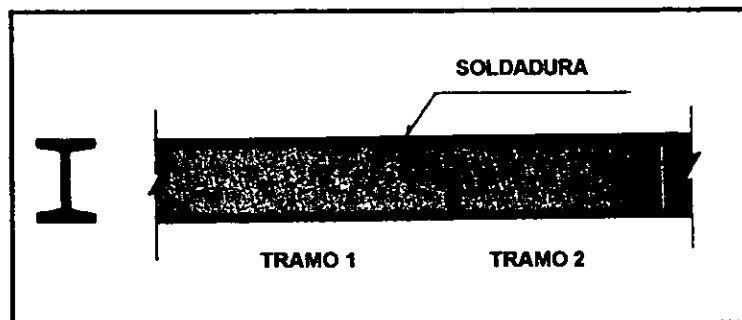


FIGURA 5.7 Soldadura en perfil estructural de pilote de acero.

Los pilotes tubulares de fondo abierto son usados para reducir al mínimo los desplazamientos de suelo durante el hincado o cuando las vibraciones deben ser mínimas. También son usados cuando a causa de las grandes profundidades de apoyo no pueden utilizarse pilotes con extremo cerrado, ya que causarían grandes desplazamientos de suelo.

Este tipo de pilotes no requiere perforación previa para su hincado y han sido usados en la cimentación de plataformas marinas donde existen grandes cargas concentradas. También son usados en apoyos de puentes y muelles en espigón.

Debe prevenirse la corrosión de este tipo de pilotes, que es mayor cuando están sujetos al efecto de mojado y secado producido por mareas o por el rocío proveniente del oleaje, o si parte del pilote se encuentra por encima del nivel del terreno. Los recubrimientos epóxicos son efectivos y no se dañan con facilidad durante el hincado. Otra forma de proteger es recubrir la zona vulnerable con concreto. Para pilotes de acero hincados en depósitos de suelo sin descomposición natural con valores de pH entre 2.3 y 8.6 y resistencia eléctrica de 300 a 50 200 Ohms-cm puede desprejarse el efecto de la corrosión. Los pilotes hincados en suelos formados por rellenos que puedan sufrir cambios en su composición deben protegerse con pintura anticorrosiva. Si los pilotes se encuentran sumergidos en agua dulce con pH cercano a 7 no necesitan protección especial.

5.1.1.6 Hincado de pilotes con desplazamiento.

Debe establecerse un plan de ataque para el hincado de pilotes, previendo que el equipo a usarse pueda tener acceso y ubicarse en todos los puntos trazados donde se hincarán los pilotes y así definir la secuencia de hincado.

Después del despegue y transporte de los pilotes de las camas de colado o el lugar de almacenamiento, se inicia propiamente el proceso de hincado con las siguientes actividades, a desarrollar por el operador, maniobristas y sobrestante.

- Colocar marca a una separación máxima de un metro a todo lo largo del pilote, para determinar con facilidad el número de golpes necesarios por cada metro de hincado.
- Todos los pilotes deben estar perfectamente limpios.
- Se levanta el pilote con un estrobo de acero colocado en los puntos correctos, de acuerdo a las recomendaciones para el manejo de pilotes (inciso 5.1.1.2).
- Se coloca en el punto correcto de ubicación o perforación previa si existe, de acuerdo a planos o especificaciones.
- Debe colocarse la cabeza del pilote al gorro o sufridera del martillo piloteador.
- Se coloca en posición perfectamente vertical o en el ángulo requerido, si se trata de pilotes inclinados, tanto el pilote como la resbaladera del martillo, corrigiendo la posición de la grúa hasta lograrlo. Usualmente se utilizan dos plomadas de referencia colocadas al frente y en ángulo de 90° teniendo como vértice el pilote.
- Se acciona el disparador del martillo, con lo que se inicia el hincado del pilote.
- Una vez iniciado el hincado no debe detenerse hasta que se haya alcanzado la profundidad de proyecto.
- Se recomienda que la desviación angular máxima admisible del pilote sea del 2% de la altura total del pilote, la tolerancia en la profundidad de hincado es de $\pm 1\%$ de la longitud total.

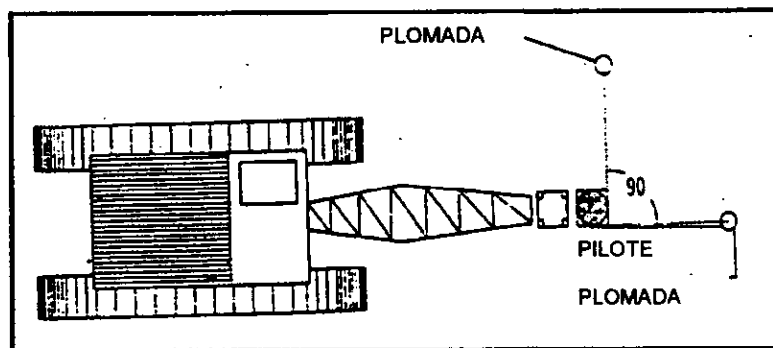


FIGURA 5.8 Ubicación de plomadas.

Debe llevarse un registro del hincado del pilote, considerando fecha, ubicación, sección del pilote, longitud del pilote, niveles, número de golpes por metro de hincado, entre otros datos. En la figura 5.9 se muestra un ejemplo de registro de hincado de pilotes.

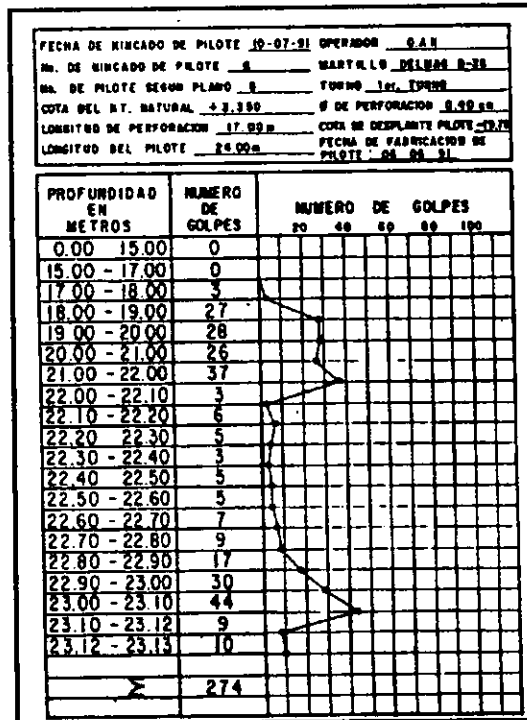


FIGURA 5.9 Reporte de pilotes.

Cada empresa utiliza un formato de reporte distinto y algunas incluyen características y notas diferentes de cada pilote, en general los datos incluidos en el reporte mostrado son los más comunes, pero debe indicarse si el pilote tiene alguna característica que haya que resaltar.

5.1.1.2 Hincado de pilotes en perforación previa.

Se presentan las siguientes recomendaciones para el hincado de pilotes en una perforación previa.

- Para facilitar el hincado se debe fabricar los pilotes con una punta de 60°, dicha punta debe reforzarse para resistir los esfuerzos a que estará sujeta durante el hincado.
- El diámetro de la perforación previa debe ser igual al círculo que circunscribe a la sección transversal del pilote.
- La perforación previa debe quedar 0.50 m. por encima del nivel de desplante recomendado y los últimos 0.50 m será hincado a golpes.
- Cuando en las perforaciones previas se efectúe extracción de material debe mantenerse la estabilidad del material, mediante ademes o con el uso de lodo bentonítico (con una densidad recomendada de 1.1), para garantizar que no se produzca azolvamiento que impida al pilote llegar hasta el fondo de la perforación previa y no se produzcan asentamientos no previstos.
- Los pilotes deben hincarse inmediatamente después de concluida la perforación previa o en un lapso no mayor de tres horas. En caso contrario debe reperforsarse, antes del hincado, para retirar o suspender el material sedimentado o caído.
- La verticalidad de los tramos de pilotes y de las perforaciones previas debe verificarse usando plomadas. La desviación no debe ser mayor que el 2% de la longitud total del pilote.
- La posición de la cabeza del pilote no debe distar respecto de la posición de proyecto La menor de las cantidades siguientes:

Más de 20 cm o 25% del ancho del pilote.

Más de 20 cm ó 25% del ancho del elemento estructural que se apoya en ella.

- Los pilotes deben alcanzar por lo menos la profundidad de la perforación previa, el hincado se podrá suspender al alcanzar el rechazo especificado para cada 10 golpes.
- Se recomienda realizar pruebas de carga en por lo menos el 2% de los pilotes por instalar y nunca en menos de tres.

5.1.1.2 Prevención de daños en el pilote.

Durante el hincado del pilote debe garantizarse la integridad estructural del pilote para que se alcance la integración suelo-pilote deseada. Se ha demostrado mediante la realización de pruebas dinámicas que la capacidad de carga desarrollada en el pilote depende en buena medida de la eficiencia con que trabaje el martillo de hincado.

Para una mayor eficiencia y evitar daños al pilote se debe utilizar un martillo pesado de baja velocidad de impacto (carrera corta), debido a que el esfuerzo producido es proporcional a la velocidad de impacto. El peso del pistón móvil no debe ser menor que 0.3 veces el peso del pilote y la energía del martillo debe ser de 0.3 kg-m por cada kilogramo de peso del pilote.

A continuación se presentan algunas reglas generales para el hincado correcto de pilotes de concreto:

1. Usar un material adecuado de amortiguamiento entre pilote y gorro.
2. Reducir la velocidad del pistón o la carrera al principio del hincado, en suelos de baja resistencia.
3. Asegurarse del adecuado ajuste entre gorro y pilote.

El hincado de pilotes de concreto (reforzado y presforzado) debe realizarse de forma tal que minimice los esfuerzos de tensión. Generalmente se presentan los siguientes problemas:

- Formación de grietas horizontales de tensión durante etapas iniciales.
- Aplastamiento de la punta o cabeza del pilote por compresión, en condiciones hincado severas.

Si se espera un hincado difícil, debe protegerse la cabeza del pilote con una placa de acero, soldada al acero de refuerzo. En todos los casos deberán achaflanarse los bordes y las esquinas de la cabeza.

5.2 PILOTES COLADOS EN SITIO.

Este tipo de pilotes es posible de utilizar cuando la densidad de cargas lo permita o se requiera debido a restricciones de espacio o existencia de diversas instalaciones o servicios que no puedan removerse y se necesite utilizar secciones pequeñas. El procedimiento de construcción de este tipo de pilotes tiene las siguientes etapas:

- Formación de la excavación.
- Habilitado y armado del acero de refuerzo. Este debe colocarse verificando la verticalidad y que esté centrado.
- Colado del concreto.
- Verificar la calidad y continuidad del concreto, utilizando muestreo directo o indirecto.

A continuación se describirá brevemente cada etapa.

5.2.1 Excavación.

La forma en como se realiza la excavación depende de las características del suelo donde ha de ubicarse el pilote. Se puede distinguir tres tipos generales de realizar la excavación que son:

1. Sin protección.
2. Ademada.
3. Con lodo

En la tabla 5.1 se muestra el tipo de suelo en que puede utilizarse cada una de las formas existentes para realizar la excavación.

En algunos casos de gran inestabilidad se hace necesario ademar la parte superior de la excavación y aplicando el lodo bentonítico al resto de la excavación. El análisis de estabilidad para una perforación inundada por lodo bentonítico, debe comparar la presión hidrostática producida por el lodo y la presión existente debida al agua del subsuelo sumada a la presión activa del suelo.

El lodo bentonítico se puede reutilizar cuando las características del suelo lo permitan y siempre y cuando cumpla con los requisitos de viscosidad y contenidos de arena establecidos.

Excavación	Tipo de suelo	Características
Sin protección	Suelos firmes o compactos , cohesivos, como arcillas, limos arenosos, firmes o duros, tobas.	El material cuenta con características que evitan que se presenten derrumbes al excavar.
Ademada	Suelos granulares sueltos o presencia de agua freática. Suelos inestables.	Constan de ademe metálico de diámetro adecuado, el espesor de paredes depende de los esfuerzos de hincado y extracción. El ademe puede ser solo de un tramo o de toda la longitud del pilote. Puede ser o no recuperable.
Con lodo	Suelos inestables que presentan derrumbes o flujo de agua.	El lodo bentonítico estabiliza las paredes formando una película plástica e impermeable en las paredes de la perforación, también suspende las partículas recortadas de suelo y enfría y lubrica la herramienta de perforación

Tabla 5.1 Características de excavación.

5.2.2 Armado y habilitado.

El armado y habilitado del acero de refuerzo debe hacerse de acuerdo a lo establecido en los planos estructurales y basándose en lo estipulado en las normas aplicables a estructuras de concreto. Deben respetarse las separaciones y recubrimientos mínimos (5 cm) y máximos(7.5 cm medio agresivo) estipulados. Cuando se usen paquetes de varillas, estos deberán tener un máximo de cuatro varillas, estos paquetes deben tener una longitud de 40φ, a menos que sean necesarios en toda la longitud del pilote.

Debe rechazarse siempre el acero que presente costras de óxido, debido a que las condiciones en que se encontrará trabajando son más agresivas que si se encontrara en la superficie. En algunos casos el dueño de la obra suministra los materiales, y la empresa solo se encarga del diseño y construcción de los pilotes y si el acero no se encuentra en buen estado debe de quedar establecida esa característica en el reporte que se realice del pilote.

5.2.3 Colado del concreto.

Los materiales que formen el concreto deben cumplir con lo establecido en las normas mencionadas en el capítulo II y adicionalmente el concreto debe cumplir con tamaños máximos de agregados y de revenimiento para facilitar el colado. La forma en que se realiza el colado del concreto varía según las características del suelo en que se va a instalar el pilote. De tal forma que se puede presentar el colado en seco y el colado bajo agua o lodo, a continuación se describirá brevemente ambas formas de colar.

5.2.3.1 Colado en seco.

Antes del inicio del colado debe verificarse que el fondo de la excavación se encuentre completamente limpio. Para iniciar el colado del fondo hacia arriba se utiliza una tubería de conos segmentados llamada "trompa de elefante", conforme se avanza se van retirando tramos de la tubería. En la figura 5.10 se muestra un esquema de este aditamento. También se acostumbra realizar el colado con tubería tremie, las características de esta se mencionan en el siguiente apartado.

Generalmente el volumen teórico estimado es inferior al volumen real de concreto utilizado, por tanto deberá preverse un volumen extra de concreto, para que el concreto se pueda colocar en una sola operación continua.

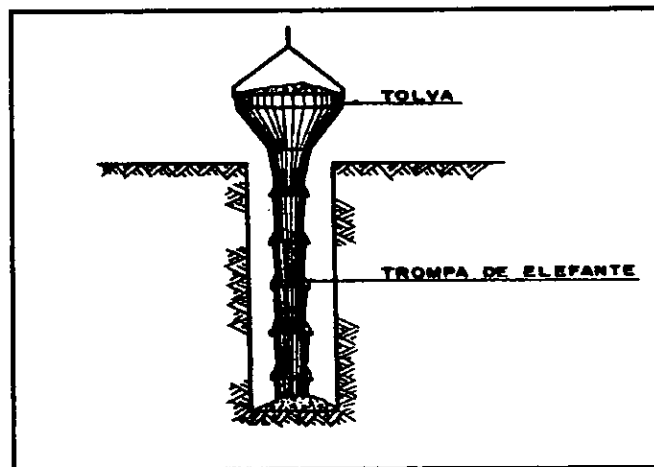


FIGURA 5.10 Trompa de elefante.

5.2.3.2 Colado bajo agua o lodo.

Cuando en la excavación se tiene la presencia de agua o de lodo bentonítico, el colado se realiza utilizando la tubería tremie que está formada por una serie de tubos roscados y una tolva que deben tener las características mostradas en la figura 5.8. El diámetro interno debe ser como mínimo seis veces el tamaño máximo del agregado. Los tramos que la forman deben ser de tres metros como máximo, deben ser fácilmente desmontables, por lo que sus cuerdas deben ser de listón o trapezoidales, debe garantizarse que la tubería sea completamente lisa por dentro y que se encuentre limpia por fuera, para que el concreto fluya adecuadamente y la tubería no se atore con el armado. En la parte superior se encuentra una tolva para recibir el concreto, esta es de forma cónica y con un ángulo de entre 60° y 80°.

Comúnmente se utilizan diámetros de 20 y 25 cm, con espesores de pared entre 6 y 8 mm. Deben realizarse rápidamente las maniobras de acoplamiento y desacoplamiento utilizando un aditamento especial para tal fin.

El colado se realiza del fondo de la perforación hacia arriba, la mayor densidad del concreto hace que el agua o el lodo sean desplazados. Debe realizarse el colado en una sola operación para evitar que el concreto inicie su fraguado y se formen tapones en la tubería, dañándola. Inmediatamente después de terminado el colado debe limpiarse la tubería para garantizar que sus paredes se conserven lisas y limpias, por fuera y por dentro.

Al iniciar el colado la tubería debe encontrarse ligeramente arriba del fondo de la perforación (no más de un diámetro de la tubería) para permitir la salida del primer volumen de concreto y de un tapón deslizante que debe colocarse a la tubería en su extremo superior, este tapón tiene como función evitar la segregación del concreto al iniciar el colado. Después de esta primera etapa la tubería debe quedar embebida en el concreto.

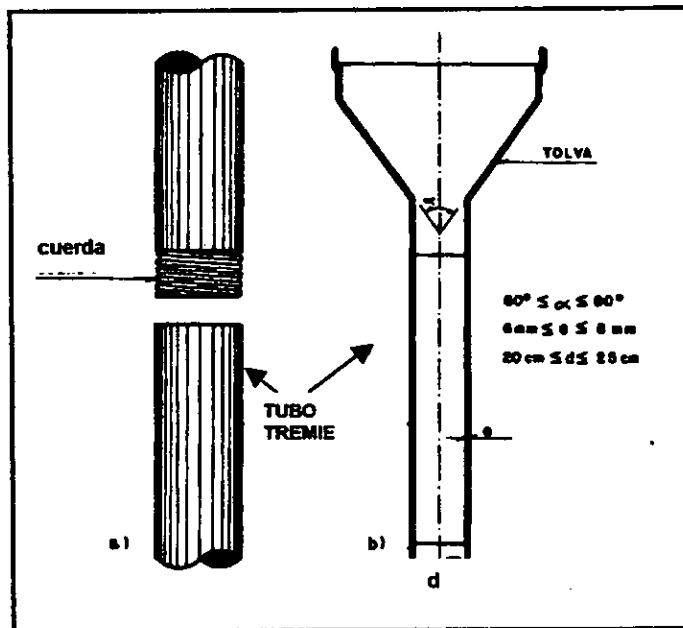


FIGURA 5.11 Tubería tremie.

CAPITULO VI.

PRUEBAS DE CARGA.

CAPÍTULO VI . PRUEBAS DE CARGA EN PILOTES.

La realización de pruebas de carga en pilotes se considera como uno de los mejores métodos para el cálculo de la capacidad de carga en este tipo de elementos de cimentación, debido a diversas causas, entre las que se pueden destacar las siguientes:

- Incertidumbre relativa a la interacción suelo-pilote.
- Alteración de las características del suelo debida a los procedimientos constructivos.
- Incertidumbre en la determinación de la estratigrafía que obliga a adoptar factores de seguridad muy elevados que incrementan los costos.
- Determinación de la longitud real del pilote.
- Posibilidad de ensayar el procedimiento constructivo.

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

Debe utilizarse para la prueba un elemento que sea representativo, generalmente un pilote igual al que ha de colocarse en la obra, además debe instalarse con el mismo equipo y sistema constructivo. En forma general debe buscarse la mayor similitud con las condiciones supuestas en los cálculos de capacidad de carga y de los asentamientos. Deben tenerse en cuenta los esfuerzos residuales provocados por el hincado en el fuste del pilote.

Los principales inconvenientes que presenta la realización de pruebas de carga son los que a continuación se mencionan:

- a) Elevado costo para realizarlas.
- b) Tiempo utilizado en su realización.
- c) Comportamiento diferente de un pilote aislado al de un grupo de pilotes.

Sin embargo en obras importantes no es un buen criterio evitar realizar estas pruebas arguyendo el tiempo y los costos de realizarlas y deben hacerse por lo menos en lugares representativos de las diferentes condiciones que han de encontrarse en el área de cimentación.

El lugar apropiado para realizar una prueba de carga no es siempre aquel en que se presentan las condiciones más críticas, debe tomarse en cuenta también la magnitud de cargas transmitidas a cada elemento con el número y características de los elementos que se colocarán en cada zona y con las consecuencias que tendría una falla en un lugar determinado.

En las diversas fuentes consultadas no se menciona la realización de pruebas de carga en grupos de pilotes. Por tanto al evaluar la capacidad de carga debe tomarse en cuenta la interacción entre los pilotes individuales que formaran al grupo.

Este tipo de pruebas tienen la ventaja de ser directas y estar realizadas a escala natural, y por tanto no intervienen variables o factores de escala.

De este tipo de pruebas puede obtenerse la siguiente información:

1. Capacidad de carga última por punta en un pilote.

Una prueba de carga bien ejecutada da valores satisfactorios de la capacidad de carga por punta en pilotes apoyados en arenas compactas o en arcillas duras. Para conocer la capacidad por punta es necesario conocer primero la capacidad de carga por fricción lateral; en la práctica es común colocar el pilote dentro de un tubo hueco de acero de forma que sobresalga solo su punta.

2. Capacidad de carga por fricción lateral.

Del resultado de una prueba de carga puede obtenerse la resistencia por fricción lateral, cuando la capacidad por punta es despreciable. En pilotes con trabajo mixto, puede usarse un dispositivo a base de gatos hidráulicos en la punta, de esta manera se evalúa la capacidad por punta en forma independiente a la fricción lateral.

3. Asentamiento total del pilote bajo carga.

El asentamiento obtenido de esta forma es bastante confiable, cuando la punta se apoya en un estrato no compresible. En pilotes desplantados en suelos cohesivos susceptibles de asentamientos de importancia o en pilotes de fricción en arcillas blandas los resultados de esta prueba no representan los asentamientos que tendrá el pilote a largo plazo, esto debido a que el fenómeno de compresibilidad está ligado al tiempo.

4. Determinación, en forma confiable de la longitud de los pilotes.

5. Ensayar el tipo de pilote, las técnicas y el equipo de hincado del pilote y si será necesario realizar perforaciones previas.

6.1 Formas de aplicación de la carga.

Existen diversas formas de aplicar la carga a los pilotes de prueba, la selección del método está basada en las características de carga y descarga que han de darse a la prueba para emular en forma aproximada la forma en que estará cargado el pilote. Existen tres arreglos convencionales para aplicar la carga:

6.1.1 Con Lastre.

En este sistema el peso es incrementado en forma gradual, llegando a alcanzar varios cientos de toneladas. Por lo que este sistema es tardado y caro, y por tanto no es recomendable. A continuación se describe brevemente los dispositivos de transferencia de carga.

6.1.1.1 Plataforma lastrada.

Consiste en una plataforma compuesta por vigas de acero que soporte el lastre. Se apoya en dos soportes laterales, estos evitan la inestabilidad de la plataforma, el lastre puede estar formado por pilotes, piezas de acero, o tanques de agua. En la *figura 6.1* se muestra un esquema de esta forma de aplicación de la carga.

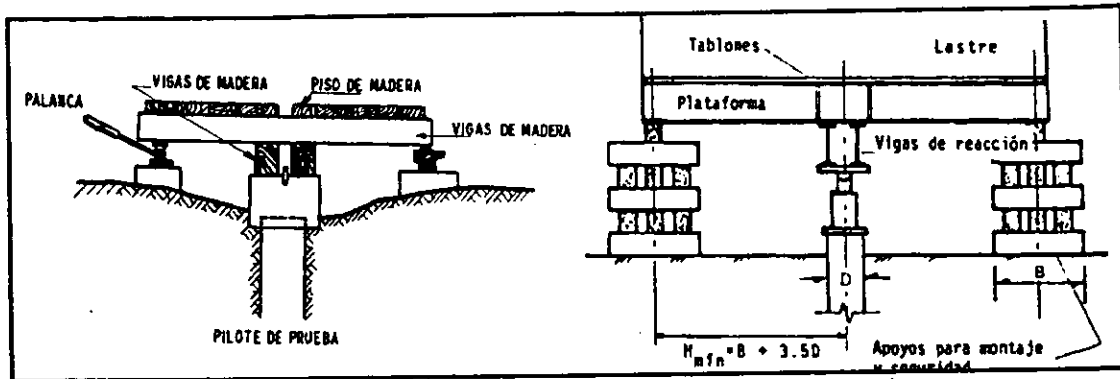


FIGURA 6.1 Vistas de esquema de plataforma lastrada.

Debe existir una distancia mínima entre el pilote de prueba y cada uno de los apoyos, esta distancia está dada por la expresión 6.1

$$H_{min} = B + 3.5 D \quad \text{Ec 6.1}$$

Donde :

- B = Ancho de la base del elemento de soporte.
- D = Dimensión transversal del pilote de prueba (diámetro o lado).

Este sistema de reacción debe operarse con cuidado, ya que se corre el riesgo de volteo por levantamiento, por tal motivo en la medición del asentamiento debe evitarse que los operadores se introduzcan debajo de la plataforma.

De ser posible el peso del lastre debe ser un poco mayor que la carga que soporta el pilote, ya que al inicio de la prueba los apoyos transmiten el total del peso del lastre al suelo y el esfuerzo disminuye conforme el pilote se va cargando, de esta forma puede disminuirse la influencia de los apoyos.

6.1.1.2 Viga en cantiliver.

Este sistema está formado por una carga viva que trabajará en voladizo, esta viga estará ligada a un pilote de reacción y transmitirá la carga de un lastre que puede ser un depósito de agua o un lastre móvil al pilote de prueba. En las figuras 6.2 y 6.3 se muestra la forma en que se instrumenta este sistema de carga.

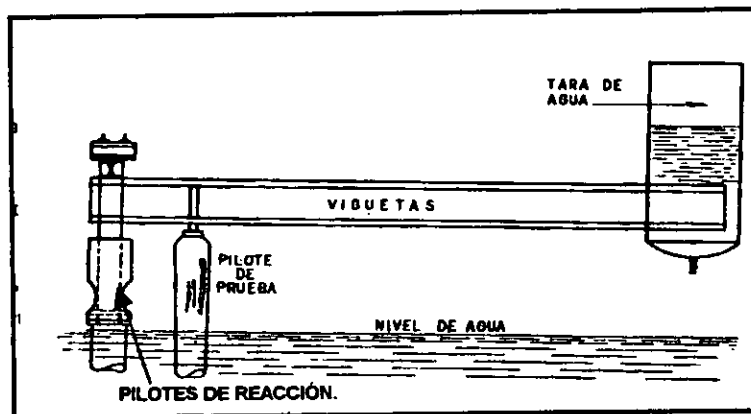


FIGURA 6.2 Viga en cantiliver con depósito de agua.

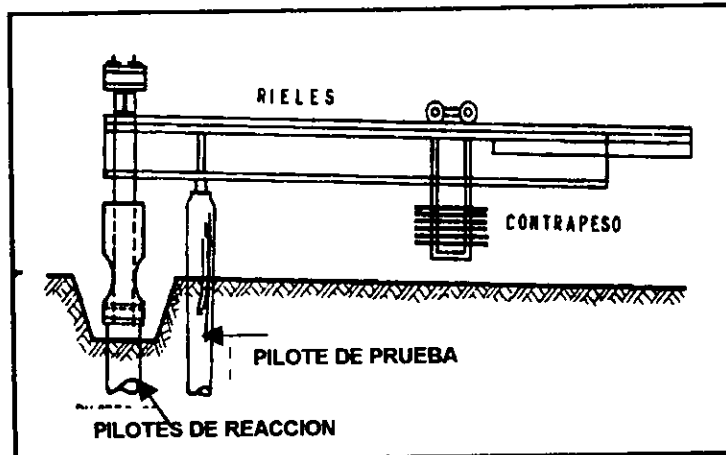


FIGURA 6.3 Cantiliver con carga móvil.

6.1.2 Con sistema hidráulico de presión.

Este sistema de carga permite regular fácilmente y con precisión la carga aplicada. Debe considerarse entre otros los siguientes aspectos:

- Debe montarse un mecanismo regulador del movimiento del pistón, para mantener la carga constante cuando sucedan los asentamientos del pilote o para permitir una deformación uniforme.
- Si el sistema cuenta con dos o más gatos, éstos deben interconectarse.
- Debe mantenerse un apoyo esférico sobre el pistón, para eliminar transferencia de momentos al pilote y facilitar la alineación.
- La transferencia de carga debe hacerse por medio de una placa horizontal de acero ligada con mortero al pilote.

Los sistemas de reacción que se utilizan con el sistema hidráulico se describen a continuación.

6.1.2.1 Pilotes de anclaje.

Pueden utilizarse pilotes inclinados y verticales para absorber la reacción del sistema, es más recomendable utilizar pilote inclinados para evitar la interacción entre pilotes de reacción y prueba, aunque económicamente es más adecuado utilizar pilotes verticales, ya que pueden utilizarse los pilotes que formaran parte de la cimentación.

Los pilotes de reacción van unidos al pilote de carga por vigas de reacción horizontales trabajando a tensión, cuando los pilotes son verticales y a flexo-tensión si son pilotes inclinados.

En las figuras 6.4 y 6.5 se muestra la disposición de este sistema, en pilotes verticales e inclinados, respectivamente.

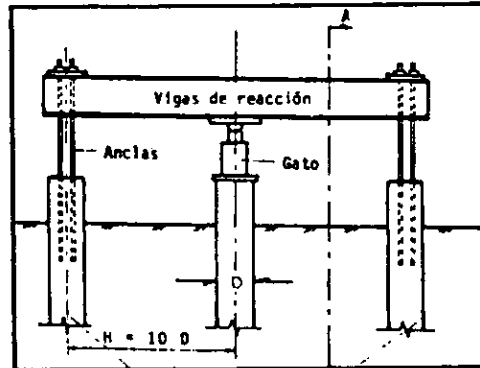


Figura 6.4 Pilotes de anclaje verticales.

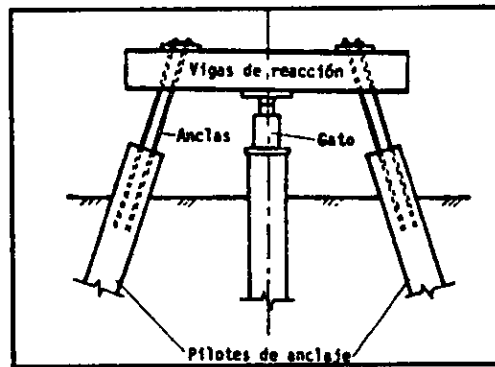


Figura 6.5 Pilotes de anclaje inclinados.

Dependiendo del nivel de carga puede utilizarse de 2 a 4 pilotes de reacción, debe calcularse la flecha que van a tener las vigas de reacción, para seleccionar adecuadamente la carrera del gato, para que sea suficiente.

La distancia entre pilotes de reacción y de carga debe calcularse mediante estudios particulares, cuando se usan pilotes verticales la separación común es de 10 diámetros, aunque en ocasiones se aceptan separaciones de 5 diámetros. En este sistema de carga la interacción entre pilotes aumenta al aumentar la carga a niveles altos.

6.1.3 Viguetas de anclaje.

Este sistema consta de viguetas de anclaje hincadas en pares en forma simétrica a los lados del pilote, que van unidos a la viga por medio de perfiles laminados, estas viguetas son de 6 a 7 m de longitud y su número varía de acuerdo a las cargas, de 4 a 24 con cargas de 100 a 600 ton, según la experiencia.

Tiene como ventajas la economía y la rapidez de su instalación, sin embargo su utilización no es muy común, debido a la falta de información sobre la interacción de las viguetas de anclaje y el pilote de prueba.

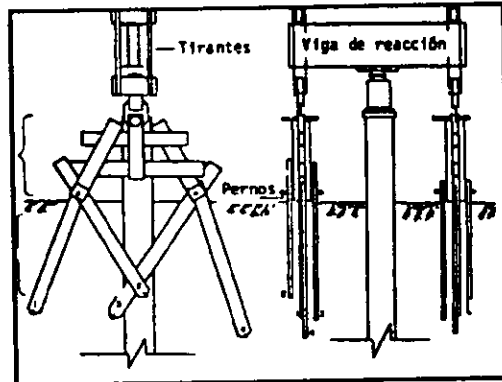


Figura 6.6 Viguetas de anclaje

6.1.4 Dispositivos de medición.

Además de los dispositivos de carga se necesita implementar dispositivos para la medición de las deformaciones y de las cargas, y también de los asentamientos que se presentan en la punta del pilote de prueba.

Para la medición de la magnitud de las cargas se utiliza el siguiente equipo:

1. **Manómetro del sistema hidráulico.** Mide la presión del sistema hidráulico de carga. La calibración debe hacerse para distintas posiciones del pistón.
2. **Celda electrónica de carga,** este dispositivo es utilizado para medir la magnitud de la carga, está formado por un cilindro de acero instrumentado con deformímetros eléctricos. Permite una mayor precisión, pero requiere una operación experta y cuidadosa.

En la figura 6.7 se muestra un esquema del manómetro del sistema hidráulico, así mismo en la figura 6.8 se muestra el correspondiente a una celda electrónica de carga.

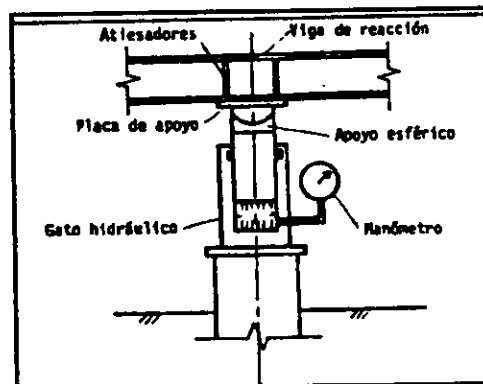


Figura 6.7 Manómetro del sistema hidráulico.

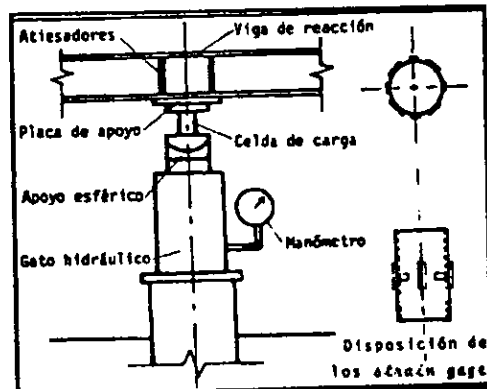


Figura 6.8 Celda de carga.

Los asentamientos que sufre el pilote de prueba deben ser registrados con equipo confiable y preciso. Para la medición de los asentamientos se utiliza:

1. **Micrómetros.**- Los micrómetros son aparatos medidores mecánicos de la deformación, se sostienen en viguetas que sirven a su vez de referencia, su vástago de medición se apoya en placas fijas alrededor de la cabeza del pilote. Es conveniente el uso de cuatro micrómetros diametralmente opuestos y equidistantes al eje del pilote, con esto se detecta si el pilote sufre inclinación durante el hincado. La precisión de este equipo debe ser ± 0.1 mm. Debe evitar que estos aparatos estén expuestos a cambios de temperatura.
2. **Nivel topográfico.**- Permite observar una escala graduada en mm adherida a la cabeza del pilote, debe situarse a una distancia no menor de 50 diámetros. La precisión de este aparato es de ± 1 mm.
3. **Sistema alterno.**- uno de estos sistemas es utilizar un cable tensado, situado a por lo menos 10 diámetros del pilote. A través del cable se realizan las lecturas de la escala graduada sobre el pilote. La precisión lograda es de ± 2 mm.

Es necesario registrar los asentamientos en la punta que sufre el pilote de prueba para determinar en forma aproximada las resistencias de punta y fricción, mediante la elaboración de una curva esfuerzo deformación del comportamiento del elemento. Para lo anterior se requiere de un micrómetro (debe sostenerse en el marco fijo de referencia), este mide el asentamiento de un tubo de acero que se aloja cercano a la punta del pilote y con sus ejes paralelos.

La precisión de este micrómetro es la misma que se manejó anteriormente para el mismo aparato.

Cuando se trata de obras importantes o de un elevado número de pilotes se puede requerir la determinación de la distribución de esfuerzos a lo largo del pilote. Estas mediciones deben hacerse utilizando celdas de carga axial colocadas a distintas profundidades. Existen dos tipos de celdas, la hidráulica y la electrónica.

6.2 Tipos de pruebas de Carga.

Las pruebas de carga se clasifican según la forma en que es aplicada la carga al pilote de prueba, de tal forma que se tienen pruebas de carga estática y pruebas de carga dinámica, en la figura 6.5 se muestra una forma de clasificarlas.

6.2.1 Pruebas de carga estática.

Estas pruebas se efectúan aplicando cargas gradualmente crecientes, mientras se mide el desplazamiento que sufre la cabeza del elemento; en la práctica la prueba se realiza hasta alcanzar por lo menos dos veces la carga de diseño, o hasta definir una carga permisible con base en la carga máxima alcanzada. Diversos procedimientos de prueba se han propuesto, la ASTM ha publicado tres normas para la ejecución de las pruebas bajo compresión axial, tensión y carga lateral. Los resultados que se obtienen de los diferentes procedimientos son similares, aunque el estudio profundo de las pruebas puede revelar fenómenos como cedencia y relajación de suelos, éstos son fundamentales para definir la capacidad de carga final y su comportamiento a largo plazo.

Estas pruebas son poco usuales, debido al alto costo de ejecución y a la magnitud importante de carga utilizada para vencer la fricción del pilote y desarrollar la capacidad de carga por punta en el estrato de apoyo.

A continuación se describe brevemente algunos de los criterios de aplicación de carga.

6.2.1.1 Criterio de carga controlada.

Este tipo de prueba permite definir la carga última que soporta un pilote, aplicando la carga en incrementos, es el tipo más ampliamente difundido, se sigue alguno de los siguientes criterios:

- a) **Rapidez de asentamiento mínimo.**- Aplicar incrementos iguales de carga cuando la rapidez del asentamiento medida en la cabeza del pilote se reduce al mínimo. El valor mínimo preestablecido del asentamiento es 0.25 mm/hr, se acostumbra que los incrementos de carga sean del 25% de la capacidad de carga de diseño Q_d (con un factor de seguridad de 3). Debe comprobarse que en cada incremento de carga el asentamiento se haya reducido al mínimo preestablecido. La carga máxima es $2Q_d$, se mantiene por 2 horas, la descarga se da en decrementos de magnitud de 0.25 Q_{max} a cada 20 minutos. Se mide la recuperación del asentamiento a los 5, 15 y 30 minutos después de haber retirado totalmente la carga.
- b) **Incrementos de tiempo constantes.**- En este criterio, se aplican incrementos iguales de carga en periodos de tiempo iguales (usualmente cada 15 minutos), la magnitud del incremento de carga es del orden del 5% de la capacidad de carga del pilote. La aplicación del presente criterio se hace necesaria en caso de que en el anterior los incrementos de carga se lleven mucho tiempo. La descarga es igual al caso anterior.
- c) **Con dos ciclos de carga y descarga.**- Es usual aplicar en este criterio dos ciclos de carga y descarga. En el primer caso se utiliza el criterio tratado en el inciso (a) y después el del inciso (b), una vez alcanzada la carga aplicada en el criterio (a) se aplica incrementos del orden de 0.1 Q_d siguiendo el criterio (a). La descarga se realiza siguiendo el criterio expuesto en (a).
- d) **Carga cíclica.**- Con este criterio se obtiene la carga de fluencia de un pilote, bajo la acción de ciclos de carga y descarga. Cada nivel de carga se mantiene el tiempo suficiente para que el pilote deje de asentarse o recuperarse. Los valores se registran cada 2 minutos. La carga puede aumentar como sigue 2/16 a 1/16; 4/16 a 2/16; 6/16 a 3/16 del valor de la carga última. Para los rangos iniciales de cargas se hacen 10 ciclos, posteriormente se incrementan a 15 ciclos y en la carga última se realiza un máximo de 20 ciclos. Se utiliza un sistema hidráulico de carga.

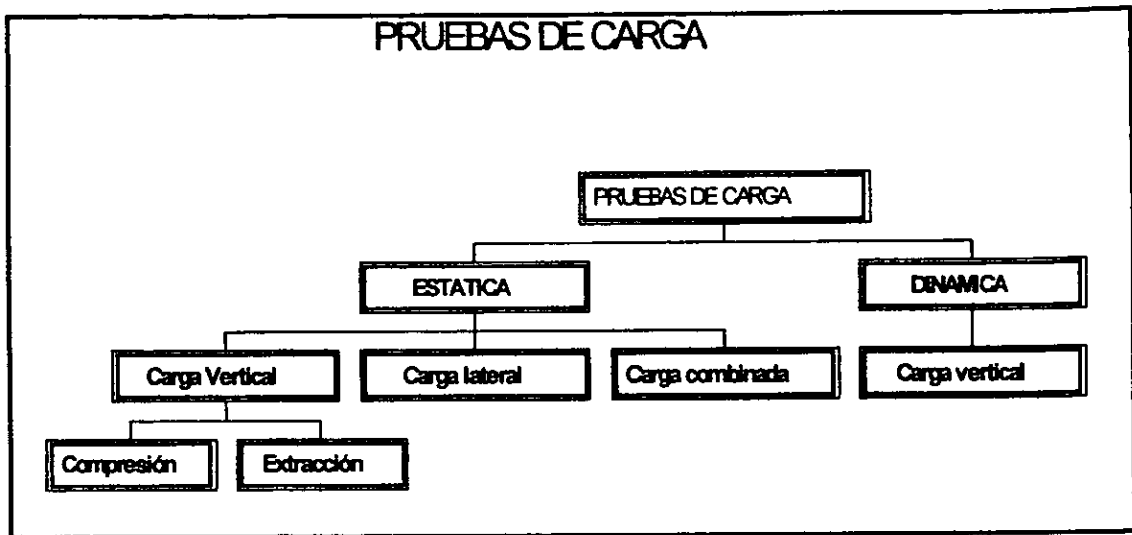


FIGURA 6.9 Pruebas de carga en pilotes.

6.2.1.2 Criterio de desplazamientos controlados.

El objetivo de este tipo de pruebas es reducir el tiempo necesario para definir la capacidad de carga del pilote. Existen dos criterios para realizarlas:

- a) Carga variable con control de asentamientos.
- b) Carga variable con velocidad de penetración constante.

Existen limitaciones para aplicar este criterio, éstas tienen que ver con la dificultad para distinguir el asentamiento inmediato para una carga aplicada y otra se debe a que es obligatorio utilizar un sistema hidráulico de carga.

6.2.1.3 Criterio asentamientos controlados.

Este criterio se basa en la aplicación de cargas que produzcan en el pilote un asentamiento de $0.01D$, donde D es el diámetro del área equivalente, este se define en la tabla 6.1, hasta alcanzar un asentamiento máximo de $0.10D$. Para obtener los asentamientos constantes se debe aplicar una carga variable en el tiempo, esta variación es del orden de 0.1% de la carga total aplicada por hora hasta ese momento.

Sección	Dimensión significativa	k
Circular	Diámetro	1.00
Cuadrada	Lado	1.13
Triangular equilateral		0.55
Octagonal		2.48

Tabla 6.1 Factores para definir diámetro significativo.

La descarga se realiza con decrementos del orden de 25% del total de la carga aplicada a cada 20 minutos, la recuperación del asentamiento debe leerse a los 5, 10, 15 y 30 minutos de haber retirado totalmente la carga.

6.2.1.4 Rapidez de penetración constante.

En este caso la carga aplicada se va aumentando para conseguir una penetración con una rapidez constante, esta es del orden de 0.25 a 1.25 mm/min en suelos cohesivos y de 0.75 a 2.5 mm/min en suelos granulares. La descarga se inicia cuando el sistema de carga alcanza su capacidad total o cuando se ha alcanzado una penetración del 15% del diámetro del pilote.

Debe tomarse las lecturas de carga y asentamiento cada dos minutos como mínimo, el intervalo anterior debe reducirse si se presentan variaciones importantes en la magnitud de la carga.

6.3 Pruebas de carga dinámicas.

Estas pruebas se efectúan para verificar la capacidad de carga, revisar la capacidad estructural y observar el efecto de la perforación previa en el desarrollo de la capacidad de carga de los pilotes.

En la ejecución de las pruebas dinámicas se deben medir las fuerzas y aceleraciones en la cabeza del pilote que son generadas por el impacto del martillo durante su hincado. Durante las pruebas de campo, utilizando un osciloscopio, se verifican en forma visual la calidad de las señales generadas para cada impacto, así como la integridad estructural del pilote. Usualmente las pruebas dinámicas se efectúan después de que los pilotes han sido hincados, una vez que se han restablecido las características del suelo, volviéndolos a golpear con el mismo equipo utilizado para el hincado.

Este tipo de pruebas tienen el beneficio de ser mucho más económicas que las pruebas estáticas, además de que se pueden realizar en un tiempo mucho menor. Sin embargo como puede desprenderse de la ligera explicación, las pruebas dinámicas no pueden sustituir a las pruebas estáticas.

En pruebas dinámicas en pilotes de punta la capacidad de carga medida depende de la energía del martillo utilizado para desarrollar el trabajo de punta del pilote.

Del análisis de este tipo de pruebas puede derivarse la obtención de curvas de transferencia, éstas curvas muestran las sollicitaciones a que estuvieron sometidos los pilotes durante la realización de las pruebas dinámicas.

Con las pruebas de carga dinámicas es posible además definir la influencia del diámetro de la perforación previa en el desarrollo de la capacidad de carga por fricción, la evolución de la capacidad de carga por fricción y los diagramas de transferencia de carga para el diseño estructural del pilote a carga vertical.

6.4 Presentación de resultados.

La presentación de los resultados obtenidos durante el hincado del pilote y la ejecución de la prueba de carga debe tener características que permitan la interpretación de la prueba de carga. Se utilizan gráficas donde se representa información básica, las gráficas más importantes son las siguientes:

- Penetración contra número de golpes.
- Recuperación elástica.
- Carga contra asentamiento.
- Carga y asentamiento contra tiempo
- Carga contra asentamiento de fluencia.
- Número de ciclos contra asentamiento..

A continuación se describirá brevemente cada uno de los conceptos anteriores.

6.4.1 Penetración contra número de golpes.

Esta gráfica representa la variación de la profundidad contra el número de golpes necesarios para producir de 0.2 a 1 m de penetración del pilote, también debe presentarse el número de golpes total acumulado para cada profundidad. Se complementa con el perfil estratigráfico y notas especiales sobre las características del hincado.

6.4.2 Recuperación elástica.

Esta gráfica es una reproducción de la gráfica de recuperación elástica que se obtiene en el último tramo del hincado, se incluye en esta una tabla con valores promedio de recuperación elástica y la penetración, medidas en la gráfica para cada serie de 10 golpes. Conviene incluir la localización y el nivel de desplante del pilote y las características del martillo.

6.4.3 Gráfica de carga contra asentamiento.

Esta gráfica se elabora para los tipos de prueba expuestos en los incisos 6.2.1.1, 6.2.1.2 y 6.2.1.3. En el caso de las pruebas con dos ciclos de carga y descarga se debe graficar el asentamiento para la carga máxima de cada ciclo de carga. En todos los casos se dibuja la parte correspondiente a la descarga.

En la figura 6.10 se muestra un ejemplo de esta gráfica de carga contra asentamiento.

Conviene dibujar esta gráfica utilizando una escala tal que la recta representativa de la compresión elástica de una columna de las mismas características del pilote. δ_e debe formar 10° con la horizontal.

El cálculo de δ_e se realiza con la expresión 6.2:

$$\delta_e = (PL / AE) \cdot 10^8 \quad \text{Ec 6.2}$$

Donde:

- δ_e = Compresión elástica, en mm.
- P = Carga aplicada, en mm.
- L = Longitud del pilote, en m.
- A = Área de sección transversal, en cm^2 .
- E = Módulo de elasticidad representativo del material de fabricación del pilote, kg/cm^2 .

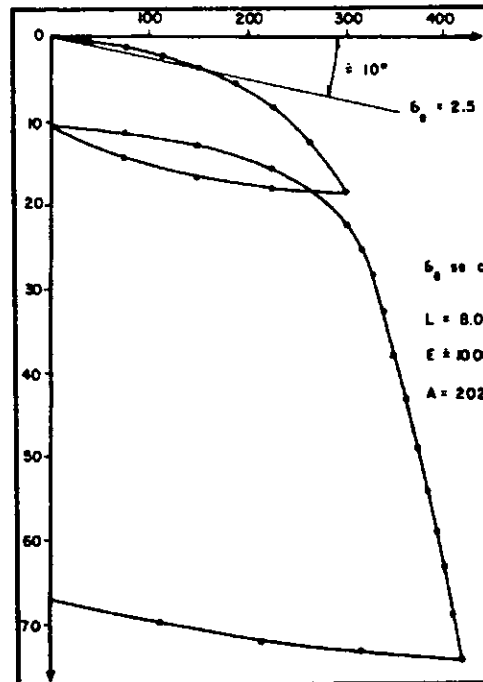


Figura 6.10 Gráfica de carga contra asentamiento.

6.4.4 Carga y asentamiento contra tiempo.

En esta gráfica se incluye la variación de la carga y el asentamiento contra el tiempo. En el eje horizontal se dibuja el tiempo a una escala tal que en 10 cm se abarque todo el tiempo que dura la prueba. Las otras escalas se dibujan como se propone en el ejemplo anterior.

Esta gráfica debe incluir a la gráfica de carga contra asentamiento en la forma como se muestra en la figura 6.11.

6.4.5 Carga contra asentamiento de fluencia.

Se utiliza en pruebas de carga controlada con incrementos de tiempo constantes se dibuja con los asentamientos presentados en los últimos 3 minutos de cada incremento de carga, deben considerarse incrementos de tiempo de 15 minutos.

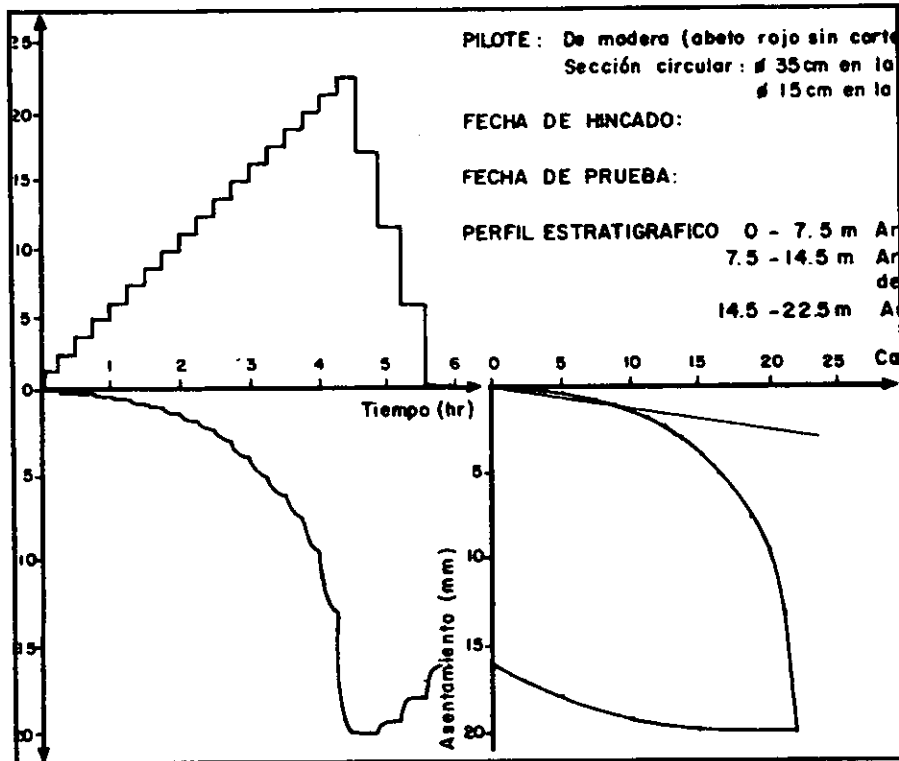


Figura 6.11 Gráficas de carga vs asentamiento y carga y asentamiento contra tiempo.

6.4.6 Respuesta del pilote a la carga.

El análisis de la forma de la gráfica carga contra asentamiento permite definir la forma en que el pilote de prueba transmite la carga al suelo, las formas de transmisión de carga fueron definidas en el inciso 1.1 del Capítulo I y que son: fricción punta, o una combinación de ambas. Esta información se complementa con el reporte de hincado del pilote, la descripción de la perforación previa y los datos geotécnicos obtenidos. En la figura 6.12 se muestran ejemplos clásicos de cada gráfica.

Las características de cada gráfica se describen a continuación.

- **Pilotes de punta.**- En este tipo la carga (P) queda por encima de δ_u , ya que el suelo alrededor del pilote soporta un pequeño porcentaje de la carga.
- **Pilotes de fricción.**- Esta gráfica presenta inicialmente asentamiento y carga crecientes, hasta un punto en el que el asentamiento crece indefinidamente con una carga casi constante.
- **Pilotes de punta y fricción.**- La gráfica de este tipo de pilotes es una combinación de los dos casos anteriores. La geometría del pilote determina la relación entre la resistencia por punta y fricción, y por tanto la forma de la gráfica.

6.4.7 Determinación de la capacidad de carga.

La capacidad de carga puede expresarse en función de los siguientes términos:

- a) **Carga última.**- Cuando se ha movilizadado la resistencia del suelo que se encuentra bajo la punta y alrededor del pilote.
- b) **Carga de fluencia.**- Es la carga máxima o el máximo número de ciclos de carga, que se puede aplicar antes de ocurrir un asentamiento excesivo.

A continuación se describe los criterios para determinar las cargas anteriores. Si por limitaciones económicas o prácticas no se pueden llevar a cabo deberá analizarse la información disponible para definir un valor confiable.

Para determinar la carga última se parte de los siguientes puntos:

- **Para movilizar la capacidad de carga por fricción es necesario** alcanzar un desplazamiento relativo entre el fuste y el suelo circundante de 6 a 10 mm, sin importar la geometría del pilote.
- **Para la capacidad por punta,** el desplazamiento debe ser de aproximadamente un 10% de D para pilotes hincados y hasta un 30 % de D para pilotes colados en el sitio.
- **Carga de fluencia.**- En las pruebas de carga controlada con incrementos de tiempo constante de 15 min. Esta carga corresponde a la que produce el radio de curvatura mínimo en la gráfica de carga contra asentamiento de fluencia que se desarrolla en los últimos 3 minutos. En pruebas cíclicas esta carga se define como la carga máxima del intervalo de carga que provoca una pendiente del 2mm de asentamiento en 15 ciclos de carga en la gráfica de número de ciclos contra asentamiento

6.5 Variación de la capacidad de carga con el tiempo

Debe considerarse que existe un lapso de tiempo entre el hincado del pilote y el inicio y realización de la prueba de carga, en el cual la capacidad de carga puede variar, cuando se trate de arcillas, limos no plásticos y arenas finas.

En las arcillas el hincado produce un remoldeo del suelo alrededor del pilote que aumenta la distribución de esfuerzos y disminuye su capacidad de carga, con el paso del tiempo la arcilla vuelve a consolidarse y la capacidad de carga es recuperada.

En el caso de limos plásticos y arenas finas se puede provocar un aumento considerable en la presión de poro, que se refleja en un aumento de la resistencia a la penetración del pilote, esta resistencia puede disminuir conforme el tiempo disipa la presión de poro. Es recomendable realizar pruebas de rehincado para determinar:

- Si es necesaria una mayor profundidad.
- Tiempo de espera previo a la ejecución de la prueba.

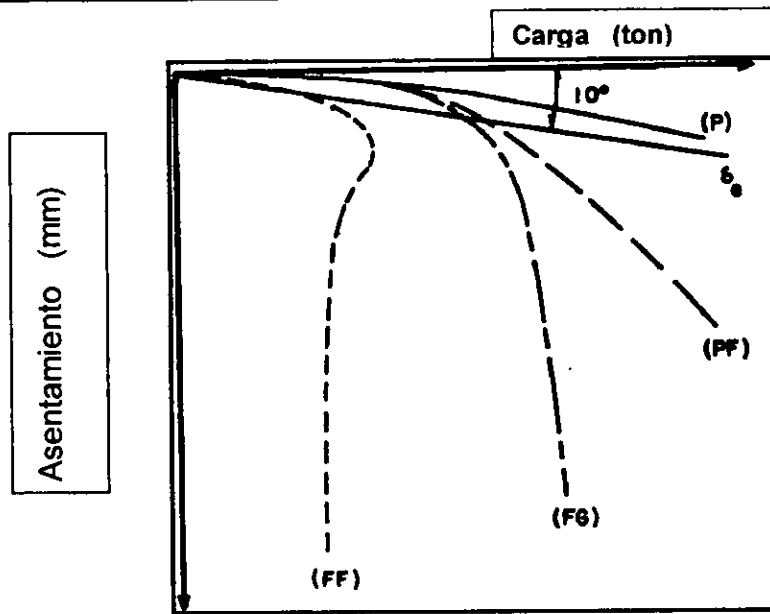


Figura 6.12 Formas típicas gráfica carga contra asentamiento.

En la gráfica anterior:

- P = Punta.
 FF = Fricción en suelos finos.
 FG = Fricción en suelos granulares.
 PF = Punta y fricción.

6.6 Ensayo de Carga "Statnamic".

Otro método de ensayo de carga es el denominado "Statnamic". La carga se aplica de manera casi estática, con duración del orden de 100 milisegundos, por lo que no es método dinámico. Al ser de pocos milisegundos 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-asentamiento 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 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 acostumbran a ser construidos "in situ", con materiales locales (concreto o acero), y de tipo modular, de manera que se puede apilar sobre el pistón en piezas manejables de no más de 3 Ton-m de forma circular, con un hueco en el centro para dejar pasar un eje centrado, 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 amortiguan la caída posterior de los contrapesos.

6.6.1 Instrumentación.

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

Si se comparan los resultados obtenidos con dos pruebas estáticas de carga y una "Statnamic" en pilotes con carga de trabajo los resultados son idénticos. Se puede ensayar un pilote al día, con un costo sensiblemente inferior al de una prueba estática convencional.

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 0.5-94) 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 costo de los ensayos.

CONCLUSIONES.

CONCLUSIONES.

De lo expuesto en los seis capítulos del presente trabajo se pueden obtener diversas e interesantes conclusiones, entre las que se encuentran las siguientes.

Existe una gran variedad de tipos de pilotes, debido a esto, se han clasificado en los tres grupos que se mencionan a continuación:

1. Por la forma en que se transmite la carga al subsuelo.
2. Por el material de que se fabrican.
3. Por el proceso constructivo utilizado en su construcción.

Dentro de estos grupos de clasificación se encuentran todos los tipos existentes de pilotes, aún cuando tengan características constructivas especiales, como es el caso de los pilotes de control, la exposición de este tema ayudó al conocimiento de las características de cada tipo determinado de pilote, esto redundará en una adecuada selección de las características y el tipo de pilote que será el óptimo para el proyecto que se vaya a realizar, aunque es importante mencionar que en la selección del tipo de pilote intervendrán factores de índole muy diversa.

La clasificación de pilotes por la forma en que transmiten la carga al subsuelo es sencilla de entender, es decir existen pilotes que transmiten la carga al subsuelo por medio de su punta, otros la transfieren a través de la fricción que se genera entre el fuste y el suelo circundante, existe además una tercera forma, que es en realidad una combinación de las dos formas de transferencia antes descritas, es decir, la carga es transmitida por punta y por fricción. En algunos casos es necesario determinar cual es la contribución real de la resistencia por punta y cual es el porcentaje con el que contribuye la fricción, en estos casos se hace necesaria la realización de pruebas de carga para definir la magnitud de cada una de las formas en que el pilote transmite la carga.

Cada uno de los pilotes tiene una relación entre ventajas y desventajas, esta relación debe evaluarse en cada caso particular, ya que ninguna obra puede realizarse suponiendo que pueda ser igual a otra. Por lo anterior dicha relación puede variar con los diferentes tipos de suelo, ubicación de la obra, disponibilidad de equipo, experiencia local en el tipo de pilote a fabricar, uso que va tener la obra y otros muchos factores que inciden en la selección del tipo de pilote.

En México los pilotes de madera son de uso poco frecuente, o son usados en obras de carácter no permanente, porque la vida útil del pilote de madera es muy corta. Aún cuando existen diversas formas de proteger este tipo de pilotes, su uso no es muy aconsejable, ya que además no se pueden utilizar en diámetros y longitudes mayores a los que puedan proporcionar las clases de árboles con que se cuente en la región en la cual se ubique la obra.

Otro tipo de pilotes son los de acero, en esta clase el principal problema es la corrosión que puede atacarlos, este tipo de pilotes tiene costos elevados debido a que la fabricación del acero en nuestro país actualmente no es muy difundida. Sin embargo presentan varias ventajas que bien pueden hacer que se seleccione los pilotes de acero por encima de pilotes de otros materiales y es posible que el alto costo inicial sea superado por las ventajas que presentan este tipo de pilotes, como son su alta resistencia, la posibilidad de usar tramos largos y el hecho de que resisten hincado en suelos duros.

Sin lugar a dudas el tipo más difundido en México son los pilotes fabricados de concreto, ya que este tipo tiene entre otras características disponibilidad de materiales, facilidad de adoptar formas diversas y tamaños variados, alcanzar grandes longitudes, el concreto puede alcanzar resistencias altas cuando se requiera, sus costos son aceptables, la experiencia en su uso es grande. No debe perderse de vista que las investigaciones sobre concretos de resistencias mayores a 500 kg/cm^2 abren mayores posibilidades para el uso de este tipo de pilotes. Existen diversas técnicas en la fabricación de pilotes de concreto, por lo anterior se puede fabricar pilotes

de concreto colados en sitio, de concreto reforzado, preesforzado y pretensado, el tipo a seleccionar dependerá de los requerimientos específicos de la obra.

El uso de pilotes especiales, como los pilotes de control ha decaído, debido a que el mantenimiento preventivo, tan necesario para su adecuado funcionamiento resulta antieconómico, además de que no existen actualmente investigaciones para sustituir la madera utilizada (caobilla) para medir las deformaciones causadas por el aumento de carga en el pilote por algún material que resulte más económico. Los pilotes entrelazados, que también fueron mencionados en la presente tesis, presentan dificultades que tienen que ver con la alteración sufrida por el suelo circundante al pilote, por lo que debe tenerse especial cuidado en la realización de las perforaciones que han de albergar a los pilotes que se apoyan en la capa dura. La falta de mantenimiento preventivo, provocó que en el sismo de la Ciudad de México de 1985 este sistema de cimentación resultara seriamente dañado y en los peores casos se presentó la falla del edificio. En el caso de los pilotes entrelazados, los edificios que contaban con este tipo de pilotes en su cimentación se asentaron grandemente y en edificios ligeros se presentó el desplome permanente, en algunos casos el volcamiento de la estructura. Con los ejemplos anteriores se demuestra la importancia del mantenimiento y las desastrosas consecuencias de no realizarlo, por ello debe evaluarse la factibilidad económica de estos sistema de cimentación antes de construirlos.

Cualquiera que sea el material de fabricación del pilote debe de cumplir con las características estipuladas en las Normas Oficiales Mexicanas y en las de la ASTM que sean aplicables al material en cuestión y que fueron expuestas en el segundo capítulo de esta tesis. Pero el control de calidad no termina en el cumplimiento de las normas, este debe incluir el manejo adecuado de los materiales de construcción. Deben establecerse los procedimientos para rechazar materiales que no se encuentren en estado óptimo, o que se considere puedan afectar la calidad final del pilote, o en su defecto si la responsabilidad del suministro de los materiales está a cargo del contratante, se debe estipular en el reporte de pilotes y en la bitácora de la obra que cierto material no satisface los requerimientos de calidad.

Una selección óptima de la maquinaria y el equipo que se utilizan en la colocación y fabricación de pilotes tiene un elevado peso específico, ya que la descompostura de alguna máquina en el frente de obra puede parar el avance de la misma, con los consiguientes retrasos y elevación de costos. Pero no solo las descomposturas pueden atrasar la obra, el no contar con la maquinaria necesaria en el frente de obra, o llevar maquinaria poco adecuada hace el avance más lento. Además no debe descartarse el hecho de que las características del subsuelo no correspondan al estudio de mecánica de suelos, por tanto es bueno llevar equipo que tenga las características necesarias para utilizarse en diversas condiciones y si es posible llevar repuestos de equipo o los accesorios que más comúnmente se dañan, con lo anterior se evitarán retrasos por descompostura del equipo.

Al momento de la selección de la maquinaria, el ingeniero a cargo debe tener presentes las características de la obra, como el tamaño de la misma, la ruta de acceso y el tamaño de los accesos. Ya que si la obra está ubicada en un zona urbana pueden presentarse dificultades con el acceso de maquinaria de mayor tamaño, como es el caso de grúas o martillos.

Otro aspecto a cuidar en la maquinaria es sin lugar a dudas el mantenimiento, debe verificarse que antes del traslado a la obra, la maquinaria debe encontrarse en perfectas condiciones, o en las mejores condiciones posibles, ya que el estado de la maquinaria incide grandemente en los tiempos y costos de la obra. Además, en el caso de pilotes hincados se ha demostrado (mediante la realización de pruebas dinámicas) que la eficiencia con que trabaje el martillo piloteador determinará en buena parte que se alcance o no la resistencia esperada por punta, esto es solo por citar un ejemplo, ya que así sucede con cualquier tipo de maquinaria.

Una de las partes más importantes de la presente tesis es la presentación del diseño geotécnico, de este capítulo se desprenden importantes conclusiones. Existen dos parámetros que rigen el diseño, estos son: la capacidad de carga y el asentamiento. Existen diversas formas de calcular los parámetros antes mencionados, la persona encargada del diseño geotécnico de los pilotes debe estar al día en cuanto a investigaciones sobre la determinación de los factores para cálculo de resistencia por punta o por fricción y conocer los variados métodos que existen para el cálculo de el asentamiento y de la resistencia. La persona encargada de dicho diseño debe conocer los alcances de cada criterio de cálculo, ya que muchos de estos no son aplicables en diversos tipos de suelo, esto es debido al carácter empírico o semiempírico de los diversos criterios.

Debido a lo anterior es importante seguir las memorias de congresos de mecánica de suelos, ya que en estos se presenta información muy importante referente a estudios recientes o casos prácticos de gran relevancia, también es importante seguir revistas especializadas, y que decir de las red mundial de la información, donde se puede encontrar una gran cantidad de información muy valiosa y de gran actualidad.

La capacidad de carga en condiciones dinámicas es un problema que no ha sido estudiado en forma satisfactoria, hasta la fecha, ni para cimentaciones profundas ni superficiales. Aunque existen diversos métodos para el cálculo de la capacidad de carga en dichas condiciones, sin embargo este tipo de trabajos quedan fuera del alcance de los objetivos de esta tesis.

Existen algunas recomendaciones constructivas elaboradas a partir de la experiencia sísmica desarrollada, dentro de estas recomendaciones destacan las siguientes:

- Debe buscarse simetría, regularidad y distribución uniforme de cargas.
- No se recomienda el uso de sistemas mixtos de cimentación (cajón + pilotes de fricción, losa y pilotes de fricción, etc)
- Los pilotes deben estar unidos mediante una red bidimensional de contrarribes.
- Los elementos de la unión entre la cimentación y la estructura deben ser capaces de resistir la fuerza de cortante horizontal y todos los efectos a que están sujetos.
- La parte superior de los pilotes (en una altura por lo menos igual a 2.5 veces su diámetro) debe considerarse como crítica y reforzarse con un porcentaje de acero mayor 0.6% que para suelos blandos. La separación entre estribos no debe ser mayor que 10 cm.
- También deben considerarse críticos y reforzarse las zonas donde los pilotes pasan de una capa de suelo a otra de diferente rigidez.

Además de estas existen consideraciones constructivas mínimas que deben llevarse a cabo para un buen desarrollo de la construcción de los pilotes, a continuación se describen algunas.

Debe planearse adecuadamente la forma en que se dará el avance de la obra, ya que en etapas finales siempre es difícil ubicar la maquinaria, por la reducción del espacio que se da al quedar los pilotes colocados en su ubicación final. Lo anterior se hace más patente si la obra que se esté realizando es una recimentación o la remodelación de alguna obra, esto por que los espacios son aún más reducidos. Esta situación debe combatirse con planeación del avance de obra.

Deben observarse las especificaciones y recomendaciones expuestas en la presente tesis, las que se encuentran en las normas correspondientes a cimentaciones profundas y todas aquellas que ayuden a que la calidad final de los pilotes sea la óptima.

Quando por alguna razón la obra se vea interrumpida y deba dejarse los pilotes ya fabricados sin colocar por largo tiempo, debe colocarse los pilotes en un lugar donde estén protegidos de la acción del intemperismo, antes de colocarlos se debe realizar las pruebas pertinentes para determinar que el pilote continúe en buen estado, y que se cumpla con lo establecido en cuanto a resistencia y estado de conservación del pilote. Si se trata de pilotes colocados en el sitio todos los materiales deben encontrarse en buen estado, los materiales que no se encuentren en buenas condiciones deberán ser rechazados. Todas las características que sean destacables deberán ser registradas en el formato del reporte de pilotes.

Hasta la actualidad la mejor forma de conocer la capacidad de carga y en algunos tipos de suelo el asentamiento, es realizar una prueba de carga; como se mencionó anteriormente, cualquier método de cálculo de capacidad de carga y previsión de asentamientos presenta cierto grado de incertidumbre. Sin embargo, las pruebas de carga estática presentan algunos inconvenientes, como son su elevado costo, el tiempo requerido para su realización, así como la necesidad de personal especializado para las etapas de instrumentación, ejecución y análisis de resultados de las pruebas de carga. Todo lo anterior ha hecho que las pruebas de carga sean realizadas únicamente en proyectos con grandes presupuestos y para obras de tamaño mediano y pequeñas. estas han caído en desuso.

Existen, por otra parte, las pruebas de carga dinámicas, este tipo de pruebas presenta ventajas como su rapidez y su menor costo de ejecución, se puede obtener de éstas valiosa información como la capacidad estructural del pilote, sin embargo no es posible obtener de ellas toda la información obtenida en una prueba de carga estática.

Antes de iniciar una prueba de carga se debe definir los objetivos de la misma, para saber que información conviene obtener y el criterio de carga que debe ser aplicado, de igual manera se debe definir el sitio donde ha de realizarse la prueba, ya que de la correcta selección del sitio dependerá la mayor o menor representatividad de la prueba. Sobre decir que, debido a la magnitud de las cargas aplicadas el personal debe extremar precauciones y tratar de controlar los imprevistos que durante la ejecución de la prueba se presenten.

Se están desarrollando nuevas técnicas de aplicación de la carga, tal es el caso de la prueba "Statnamic", que fue presentada en el capítulo VI de la presente tesis, pero aún no se cuenta con suficiente información de éstas en nuestro país y por lo tanto se desconocen sus alcances.

ANEXO FOTOGRAFICO.



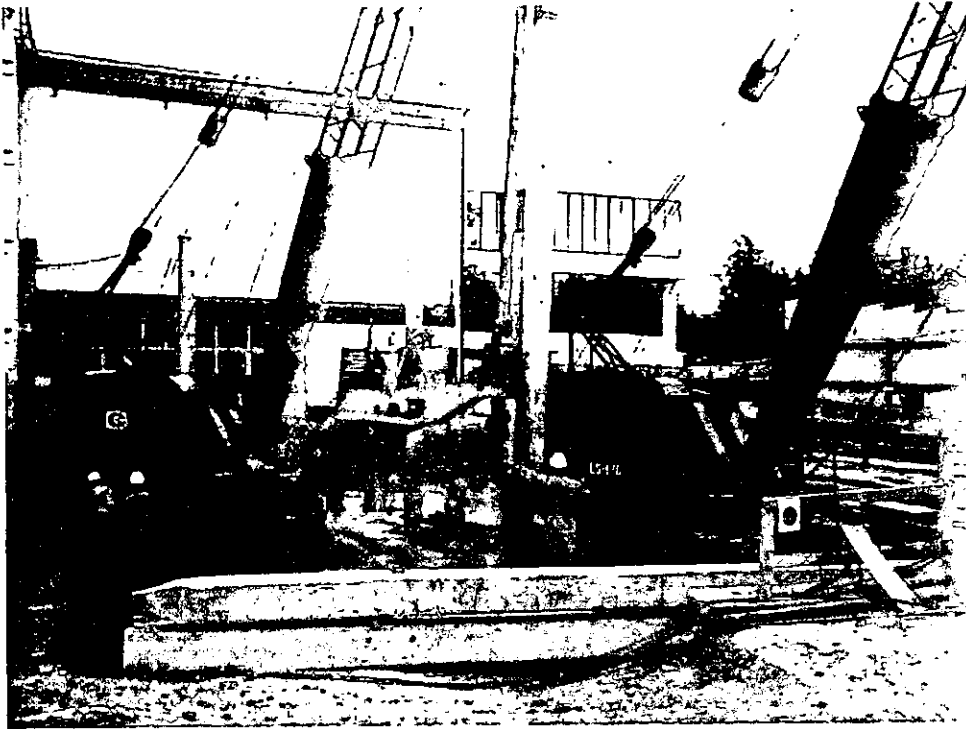
FOTOGRAFIA No. 1

En la imagen se presenta el proceso de realización de la perforación previa del sitio en donde se colocará un pilote.



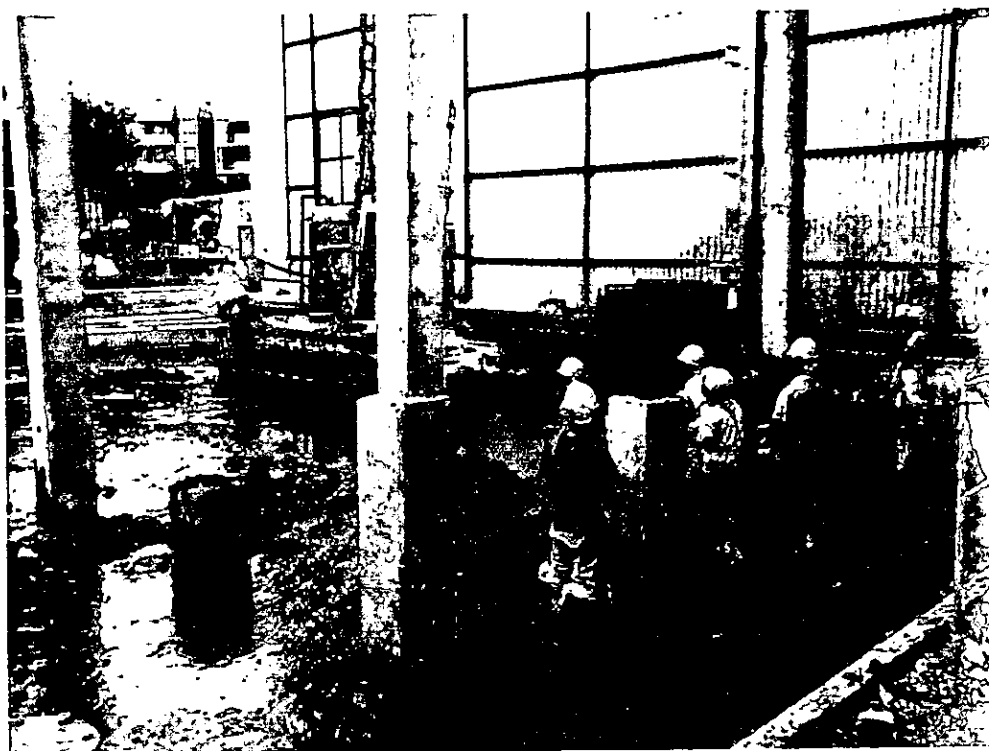
FOTOGRAFIA No. 2

En la fotografía se observa el momento en que una sección de pilote es transportado por medio de la grúa al punto donde será hincado. Es importante notar la restricción en cuanto al espacio.



FOTOGRAFIA No.3

En la fotografía se presentan algunas de las maniobras que la grúa y el personal especializado realizan en el transporte de los pilotes en la obra. Nótese que el uso de equipo de seguridad es indispensable.

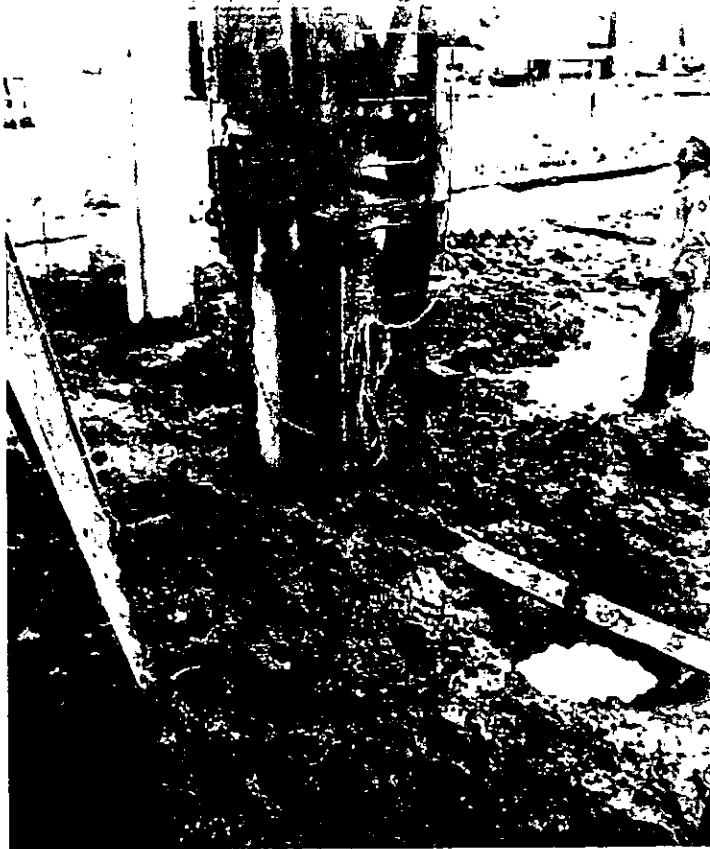


FOTOGRAFIA No.4

En la fotografía se puede apreciar el momento en el que la grúa esta colocando la sección de pilote en la perforación realizada minutos antes. Las operaciones de perforación e hincado deben ser continuas, para evitar caídos en el fondo de la perforación.

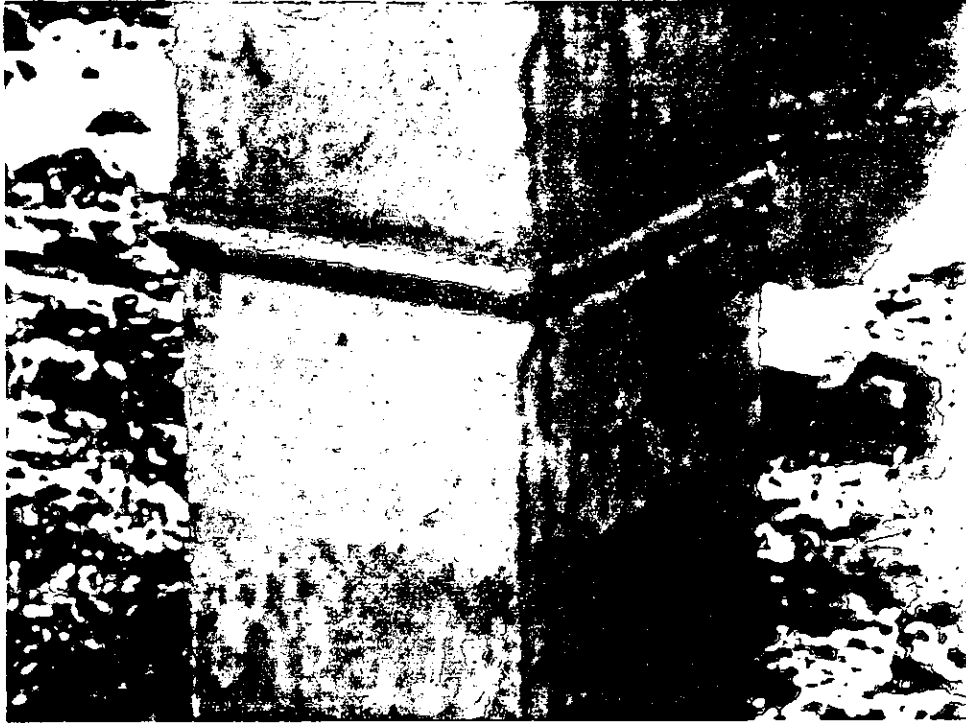


En la fotografía se aprecia el proceso de hincado del pilote en su parte inicial.



FOTOGRAFIA No.6

En la foto se aprecia el proceso de hincado del pilote en su parte final.



FOTOGRAFIA No.7

Aspecto de la soldadura que sirvió de unión para las dos secciones de un pilote



Fotografía No. 8.

En la fotografía se observa como se va reduciendo el espacio de maniobras de la maquinaria.



Fotografía No 9

En la imagen se muestra el momento en el que un pilote esta a punto de ser hincado en el subsuelo.



Fotografía No 10

En la imagen se muestra el momento en el que un pilote esta a punto de ser hincado en el subsuelo.



Fotografía No 11

En la imagen se muestra el área de trabajo inundada con lodo y agua, mismos que deberán ser retirados antes de la construcción de la losa de fondo.

BIBLIOGRAFÍA.

Análisis y diseño sísmico de cimentaciones en el Valle de México.

Auvinet Gabriel.

Instituto de Ingeniería y DEPI, UNAM.

Cálculo de asentamientos de cimentaciones sobre pilotes de fricción.

León, José Luis y Resendiz Daniel.

Instituto de Ingeniería y DEPI, UNAM.

México, 1979.

Ingeniería de cimentaciones.

Fundamentos e introducción al análisis geotécnico.

Delgado Vargas, Manuel.

Editorial Alfaomega.

Segunda edición.

México, 1999.

Ingeniería de cimentaciones.

Peck, Ralph B., et al.

Editorial Limusa.

Cuarta reimpresión a la segunda edición.

México, 1990.

La Ingeniería de suelos en las vías terrestres.

Carreteras, ferrocarriles y aeropistas. Vol. 2.

Rico Rodríguez, Alfonso y Del Castillo Mejía, Hernilo.

Editorial Limusa.

Octava reimpresión.

México, 1993.

Manual de diseño y Construcción de pilas y pilotes.

Segunda reimpresión.

Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.

México, 1989.

Mecánica de suelos.

Tomo II. Teoría y aplicaciones de la Mecánica de Suelos.

Juárez Badillo, Eulalio y Rico Rodríguez Alfonso.

Editorial Limusa.

Decimotercera reimpresión de la segunda edición.

México, 1999.

Mecánica de suelos y Cimentaciones.

Crespo Villalaz, Carlos.

Editorial Limusa.

Segunda reimpresión a la Cuarta edición.

México, 1993.

Reunión Nacional de Mecánica de suelos. Zacatecas 1992.

Experiencias con pruebas dinámicas en pilotes de punta.

León P Elvira y José A Segovia P.

Memorias editadas por la SMMS.

México, 1993.