

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

**PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA CIVIL**

**CIMENTACION POR PILOTES**

**T E S I S**

**PARA OPTAR EL GRADO DE  
INGENIERO CIVIL**

**ROLANDO ECHAVE MERCADO**

**LIMA - PERU**

**1975**

## CIMENTACION SOBRE PILOTES



### P R O G R A M A

- I. INTRODUCCION
- II. TIPOS DE CIMENTACION
- III. ESTUDIO DE MECANICA DE SUELOS
- IV. ELECCION DE EQUIPO DE CIMENTACION
- V. DISEÑO ESTRUCTURAL
- VI. METODO DE CONSTRUCCION
- VII. EQUIPO DE CLAVADO
- VIII. PRUEBA DE CARGA
- IX. C O S T O
- X. CONCLUSIONES

# P R O G R A M A

## INTRODUCCION

### CAPITULO I

#### TIPOS DE CIMENTACION.

- Cimentación superficial
- Cimentación profunda
  - . Pilotes prefabricados
  - . Pilotes "in situ": Franki  
Rodio

### CAPITULO II

#### ESTUDIO DE MECANICA DE SUELOS

- Estratigrafía
- Parámetros de diseño

### CAPITULO III

#### ELECCION DEL TIPO DE CIMENTACION.

- Tipo de cimentación profunda
- Diseño por capacidad portante

### CAPITULO IV

#### PRINCIPIOS PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL

- Cálculo estructural

- Chequeos: por izajes  
por clavado

## CAPITULO V

### METODO DE CONSTRUCCION

- Proceso constructivo
- Secuencia de clavado

## CAPITULO VI

### EQUIPO DE CLAVADO

- Tipos de martillo  
Elección del tipo de martillo  
Informes sobre Trabajos de Hincado.

## CAPITULO VII

### PRUEBAS DE CARGA

- Tipos y Mercados de Prueba
- Reglas para determinar la carga de trabajo.

## CAPITULO VIII

### CONCLUSIONES Y

### RECOMENDACIONES.

BIBLIOGRAFIA:

Terzaghi y Peck

Bowles

Chellis

Dunham

Tomlinson

Davidian

Harr

## I N T R O D U C C I O N

Como sea que las cimentaciones constituyen la base de los edificios y estructuras, deben reunir todas las garantías para soportar el peso de los mismos y las sobrecargas accidentales y transmitir las adecuadamente al terreno en que están asentadas.

El primer requisito para el estudio de cada cimentación, es una cuidadosa investigación de las condiciones del subsuelo en donde se proyecta el edificio o estructura.

Como investigaciones preliminares es necesario la comparación con los estudios efectuados en las proximidades del lugar en que se propone construir la estructura. Cuando las referencias son deficientes, la investigación del subsuelo es doblemente importante.

Puesto que la naturaleza ha distribuido los suelos de una forma errática es realmente dificultoso averiguar cuál será su comportamiento cuando sean solicitados por las cargas. Las soluciones deben estar basadas en el buen criterio del ingeniero, siendo el responsable de su buen funcionamiento.

Según D. P. Krynine "Al desarrollar un proyecto de cimentaciones, el ingeniero debe tener en cuenta tres signos, a saber, +, - y \$". El plantear y desarrollar el proyecto de una cimentación que ofrezca seguridad con el mínimo costo

es el tipo de problema con que normalmente ha de enfrentarse. Siempre e inevitablemente ha de interesarse por el problema económico. Dice un antiguo refrán que el ingeniero es un individuo que puede construir por un sol lo que otro podría construir por dos. A pesar de que exista o no presión económica, un buen ingeniero deberá esforzarse para servirse lo más posible de los hombres, los materiales y el dinero. (4).

Teniendo en cuenta los conceptos vertidos anteriormente se ha desarrollado el presente trabajo que pretende describir en lineamientos generales los pasos mínimos necesarios para diseñar y llevar a cabo un proyecto de cimentación por pilotaje teniendo como aplicación práctica los trabajos efectuados en la cimentación de la Ampliación de la Refinería de Petróleos del Perú en Talara - Piura.

## CAPITULO I

### TIPOS DE CIMENTACION

La naturaleza del terreno, su resistencia específica y la presencia de agua influyen en la elección del tipo de cimentación a adoptar en la construcción de un edificio. También está influido el otro tipo por la clase y disposición de las cargas y sobrecargas de la super estructura.

Podemos clasificar las cimentaciones en superficiales y profundas. Superficiales son las que pueden efectuarse en terrenos resistentes, en los que para alcanzar el nivel de cimentación se precisa poca profundidad de excavación.

Se denominan profundas aquellas en que el plano de apoyo del terreno consistente se encuentra a grandes profundidades, recurriéndose en éstos casos a efectuar obras de consolidación para mejorar la naturaleza de los estratos de po-

ca resistencia o a otros procedimientos aptos para repartir la carga a terreno resistente como el uso de pilotes.

Es conveniente que los cimientos de un edificio se apoyen sobre el mismo estrato de terreno consistente, ya que en caso contrario pueden presentarse fallas capaces de provocar deslizamientos y asentamientos de las cimentaciones. Deben tener además la superficie necesaria para resistir uniformemente las cargas y sobrecargas del edificio y ser completamente impermeables, a fin de evitar las humedades y filtraciones.

Como se dijo anteriormente se dará mayor énfasis en las cimentaciones por pilotaje, en consecuencia el estudio de cimentaciones superficiales será breve y de lineamientos generales.

### Cimentación Superficial

Las cimentaciones directas u ordinarias constituyen la base sobre la que se asientan los edificios industriales y viviendas.

La estática nos demuestra que las condiciones de equilibrio de una cimentación se logran cuando la suma de todas las fuerzas, cargas, sobrecargas y reacciones de una resultante nula, o sea que la suma geométrica de sus componentes verticales y horizontales es nula. La suma de los momentos de dichas fuerzas debe ser nula y el punto de aplicación de la resultante incide en el centro de la base del cimiento,

con lo que no existe el peligro de vuelco.

Cuando el terreno es bueno, se practica la excavación en toda la extensión de los muros y en profundidades del orden de 1 metro para evitar los terrenos de cultivo y efectos de heladas. (Ver figura N<sup>o</sup> 1).

Para el cálculo de las cimentaciones consideraremos el caso de carga centrada P supuesta una sección S de la super estructura y T el coeficiente resistente del terreno, tendremos:

$$S = \frac{P}{T} \quad \text{y} \quad S = ab$$

que nos da el valor de la sección necesaria de la cimentación.

Se se adaptara por economía varias macizas de concreto de diferentes dosificaciones tendríamos:

$$S_1 = \frac{P}{T_1} \quad S_2 = \frac{P}{T_2}$$

$$S_3 = \frac{P}{T_3} \quad S_4 = \frac{P}{T_4}$$

Para hallar la presión total sobre el terreno habrá que considerar el peso de la cimentación.

Siempre que sea posible, las bases de las cimentaciones deberán ser proyectadas de manera que la resultante de todas las fuerzas (cargas y sobrecargas) actúe en una línea coincidente con el eje de las cimentaciones.

Cuando dicha resultante no coincide con el eje de gravedad de la base, además de los esfuerzos de compresión, actúa un momento de volteo debido a la excentricidad y cuyo valor será:  $M = Pe$ ; la base está entonces sometida a una carga excéntrica y en consecuencia la presión sobre el terreno no es uniforme, variando entre un máximo  $T_1$  en un extremo y un mínimo  $T_2$  en el otro.

En la figura 2 podemos ver la distribución de las cargas sobre el terreno en el caso de incidir la resultante en el tercio central de la base; en éstas condiciones la excentricidad es menor que  $l/6$  siendo la longitud de la base y sólo se presentan compresiones.

Cuando actúan fuerzas horizontales, la resultante incide oblicuamente sobre la base y puede descomponerse (fig. 3) en sus componentes verticales (N) y horizontal (Q). La primera pasa por el centro de gravedad y produce cargas unitarias normales, cuyo valor constante es:

$$T_n = \frac{N}{S}$$

La fuerza tangencial (Q) es contrarrestada por el rozamiento (fricción) entre el terreno y la cimentación, y el empuje pasivo de las tierras; queda limitada a la condición de que la resultante R forme con la normal a la sección un ángulo menor que el de fricción.

El momento de giro motivado por el par  $N \times e$  produce en la sección del plano de cimentación las cargas unitarias

rias de flexión.

$$T_{M_1} = \frac{M}{W_1} \quad \text{y} \quad T_{M_2} = \frac{M}{W_2}$$

donde  $M = N \times e$

y las cargas unitarias totales serán:

$$T_1 = T_N + T_{M_1}$$

$$T_2 = T_N + T_{M_2}$$

Si consideramos una sección rectangular

$$W_1 = W_2 = \frac{S \times l}{6} \quad \text{y operando tendremos}$$

$$T_1 = \frac{N}{S} \left( 1 + \frac{6e}{e} \right)$$

$$T_2 = \frac{N}{S} \left( 1 + \frac{6e}{e} \right)$$

Si la resultante incide fuera del tercio central (fig. 4), la excentricidad es mayor que  $1/6$  y la distribución de presiones tiene lugar como indica la figura; en secciones rectangulares, la presión máxima se deduce determinando la posición de la línea neutra. (fig. Nº 4)

$$L_o = \frac{I_o}{M_o}$$

En esta fórmula  $I_o$  es el momento de Inercia de la zona comprimida respecto a la línea neutra y  $M_o$  es el momento estático de la zona comprimida respecto a la línea neutra. La fatiga  $T = cd$  en la que  $c$  es el coeficiente angular de la línea de distribución de fatigas, y la fatiga máxima  $T_1$  a la distancia  $d_1$ , será:

$$T_1 = \frac{N}{M_o} d_1$$

Para una sección rectangular tendríamos:

$$M_o = \frac{g d_1^2}{2}; \quad I_o = \frac{g d_1^3}{3}; \quad l_o = \frac{2 d_1}{3}$$

$$\text{como } d_1 = l_1 + l_o = l_1 + \frac{2 d_1}{3} \quad \text{de donde}$$

$$d_1 = 3e_1$$

de modo que actuando  $N$  en el tercio exterior:

$$T_1 = \frac{N d_1}{M_o} = \frac{2 N}{3 g l_1} \quad \text{Después de hacer los reemplazos correspondientes.}$$

El momento de vuelco debido a las cargas horizontales debe ser equilibrado por el momento debido a las cargas verticales.

$$M_v = H h k = N \left( \frac{1}{2} - e \right)$$

El valor de  $K_1$  coeficiente de seguridad del vuelco no debe ser nunca inferior a 1.5.

Las cimentaciones de concreto en masa se puede clasificar según se trate de muros, pilares, etc.

Ya hemos indicado anteriormente la manera de calcular las cimentaciones según se trate de cargas centradas o excéntricas. Al proyectar una losa de concreto en masa (es decir, de concreto no armado) debe tenerse en cuenta que posea el suficiente espesor para minimizar las fuerzas de tracción en las peores condiciones, ya que como es sabido la resistencia a la tracción del concreto es en el mejor de los casos de aproximadamente 10% de la resistencia a la compresión.

Para las columnas, en que éstos transmiten toda la carga de los edificios, se proveen cimentaciones de concreto en masa de gran anchura, frecuentemente de sección cuadrada y en forma tronco-piramidal (como puede verse en la figura 5), repartiendo la carga según un ángulo de  $60^{\circ}$ , la experiencia ha demostrado que los esfuerzos se reparten uniformemente, siguiendo una línea que forma un ángulo de  $60^{\circ}$  con la horizontal.

Las cimentaciones en pirámide prensada, resultan, dada su configuración, difíciles y costosas de realizar, ya que es necesario disponer de encofrados para lograr la sección y como por lo general es preciso efectuar la excavación de la zapata en toda su anchura, se prefiere la sección rectangular.

En condiciones normales, el concreto armado se em-

plea con ventaja en las cimentaciones por la economía en el volúmen de excavaciones, material y peso de la losa a construir.

### Cimentación Profunda

Se discutirá el tipo de cimentación profunda más utilizado: el pilotaje que es empleado en los terrenos de poca resistencia, o bien cuando el terreno consistente se encuentra a gran profundidad y las cargas y sobrecargas que gravitan sobre las estructuras son muy importantes; o sea siempre que los demás sistemas de cimentación resulten excesivamente costosos por el gran volúmen de excavación y movimiento de tierras. También son necesarios los pilotajes cuando se trata de terrenos acuíferos o anegados permanentemente.

Desde tiempos prehistóricos han sido utilizados los pilotes en sus diversas formas; las viviendas lacustres y palafitos son una prueba del empleo de los piloteos de madera para la construcción en la mas remota antigüedad.

El estudio é hincado de los pilotes ha absorbido durante muchos años la atención de ingenieros y técnicos de la construcción. Su empleo más corriente es para la transmisión de cargas pesadas a través de las superficies blandas o inestables del terreno hasta las capas más duras o estables situadas bajo el suelo en que se quiere asentar una estructura. Cuando el objeto perseguido es el citado, se les

designa como pilotes de apoyo o punta; en caso contrario pilotes flotantes. También son utilizados para muros de sostenimiento de tierras y de resistencia a fuerzas horizontales; a este grupo pertenecen las tablestacas.

Además su utilización es muy diversa; así tenemos que el peligro de deslizamiento de los pilares de concreto de puentes queda eliminado empleando como sistema de cimentación una losa apoyada sobre pilotes hincados en el lecho del río. En la construcción de diques, presas, muelles, etc., son de gran utilidad los pilotes, ya como pilares de asiento o soporte, de anclaje como obras de defensa, de consolidación de terrenos flojos, terraplenes, etc.

### Tipos de pilotes

Los pilotes pueden ser clasificados según la clase de material que entra en su composición en: pilotes de madera, de concreto, de acero y compuestos.

### Pilotes de Madera

La forma de pilotaje más antigua es, sin duda alguna, el pilote de madera y fue utilizado en Europa por el hombre prehistórico en forma de cimentaciones rudimentarias destinadas al soporte de sus viviendas lacustres. Estos pilotes tenían de 5 a 25 cm. de diámetro y hasta 7.50 m. de lon-

gitud.

En Europa los pilotes de madera han sido utilizados continuamente desde la Edad Media; las ciudades de Holanda y Venecia emplearon en gran escala dichos pilotes de madera para asentar las cimentaciones.

La principal ventaja del pilote de madera es su bajo precio; no obstante, no siempre es el más barato, ya que en su costo influye una serie de factores.

Los pilotes de madera son utilizados para cimentaciones profundas que han de permanecer constantemente debajo del nivel de las aguas permanentes, ya que si están expuestas al contacto de los agentes atmosféricos y a las alternancias de humedad y sequedad, se produce la putrefacción. La humedad origina su putrefacción, las vegetaciones parásita y el moho; también se presenta la perforación causada por el carcinoma. Como medios preventivos se utilizan los tratamientos químicos a base de sales de cobre, zinc, mercurio, etc, y los orgánicos a base de creosota, carbolineum, etc.

Las maderas más apropiadas son las de pino, encina, haya, aliso, alerce, nogal y roble.

Los pilotes más duros y resistentes son los obtenidos con madera de roble americano y sus variedades colaterales. Le siguen en dureza y resistencia, las maderas de roble corriente, olmo, arce, haya, abedul, nogal americano, fresni, sicomoro, castaño y aliso.

Los pilotes semi-duros comprenden los de madera de ciprés, alerce y pino. Los de esta última madera son los mas convenientemente utilizados, ya que son más rectos y pueden ser obtenidos de grandes longitudes.

Los de roble, con ser excesivamente caros, son poco rectos y sus diámetros no guardan proporción con sus longitudes, o sea al revés de lo que ocurre con los de pino.

En cuanto a dimensiones, los diámetros de los pilotes de madera no excederán de los 50cm; puede estimarse que para 4 m. de longitud el diámetro mínimo será de 20 cm, aumentando 2 cm. por cada metro de longitud. También puede expresarse el diámetro en centímetros en función de la longitud en metros con la siguiente fórmula:  $d = 12 + 3 l$

Para la construcción de un pilote de madera se escogen árboles bien derechos, de 20 a 30 cm. de diámetro, según su longitud; se descortezan con cuidado y se aguzan las puntas en forma de pirámides. Para terrenos duros y compactos se aguzan en una longitud equivalente al diámetro del pilote; en cambio para terrenos sueltos incoherentes aumenta esta longitud hasta 2 a 2 1/2 veces el diámetro.

Cuando un pilote no penetra más en el terreno, se suspende provisionalmente la hinca, reanudándolo días más tarde; el terreno muy comprimido transmite su comprensión a cierta distancia y se puede continuar hincando el pilote. Con el fin de facilitar la hinca y proteger la punta del pilote se le refuerza con un azuche o punta metálica

(ver fig. 6) facilita la penetración de los estratos resistentes. La cabeza del pilote también se refuerza algunas veces para evitar que la madera se resquebraje por la acción repetida del martillo.

Para facilitar las operaciones de la hinca, puede utilizarse también el chorro de agua, que consiste esencialmente en el desplazamiento del material que compone el estrato del lugar en que se propone hincar el pilote, por medio de uno o más chorros de agua a presión moderada; de esta manera, si se trata de arena, ésta cambia constantemente de sitio delante de la punta del pilote, el cual puede penetrar de manera continua casi sin el empleo del martillo; pero si en lugar de arena es arcilla o forma la arena una capa dura será preciso el empleo del mazo.

Aunque el chorro de agua de buenos resultados en la hinca de pilotes en las mezclas de arena, sedimentos y gravas y regulares en los lodos y gredas, algunas arcillas y materiales duros, su mayor campo de utilización son las arenas finas y puras. Es más importante en esta operación la cantidad de agua que la velocidad. El equipo de chorro consiste simplemente en una tubería de hierro ó acero de 2 1/2 pulgadas de diámetro interior conectada a una bomba.

En cuanto al número de pilotes de madera que pueden ser hincados por día depende de muchos factores; tamaño de los pilotes, distancia entre los mismos, profundidad de hincado, clase de terreno, tipo de martillo o mazo empleado,

uso o no del chorro de agua, experiencia, etc.

Poca capacidad de carga, por lo que se hace necesaria una gran cantidad de pilotes, gran extensión de superficie y mucho tiempo para la ejecución del pilotaje.

La dificultad de substitución de un pilote que haya sufrido un proceso de putrefacción o esté carcomido, cuando se trata de una cimentación de edificio o estructura.

En el país el mayor uso de los pilotes de madera recae en defensas (de madera) para muelles.

#### PILOTES DE CONCRETO

El aumento de costo de los pilotes de madera, así como la poca duración y pobre capacidad de carga de los mismos, ha dado a los pilotes de concreto, en sus diversos tipos, la oportunidad de su empleo, con éxito en todos los casos.

La más importante ventaja de los pilotes de concreto es la de ser inalterables a los agentes atmosféricos, así como a los cambios de las condiciones del terreno, ya sea éste seco o húmedo y su durabilidad es independiente del nivel de las aguas subterráneas, así como de las bajas o altas mareas y tampoco están expuestos al peligro devastador de los insectos.

Las mayores dimensiones reducen el número necesarios de los mismos para soportar una estructura dada.

Así como los pilotes de madera pueden soportar una carga de 10 a 20 toneladas cada uno, los de concreto sobrepasan fácilmente las 50 toneladas.

Sin embargo, los pilotes de concreto por su volumen y peso, son más caros y generalmente más incómodos y costosos de trasladar e hincarlos que los de madera. No pueden ser hincados tan rápidamente como los de madera, pero como para una misma carga a soportar es menor el número requerido influye notablemente en el costo total y en el tiempo necesario.

Los pilotes de concreto pueden clasificarse en prefabricados y contruídos en el lugar del trabajo, o sea in situ; también pueden ser armados o no, siendo siempre del primer tipo los prefabricados. Los contruídos in situ pueden ser divididos en dos tipos: aquellos en que la armazón, molde, funda o tubo que sirve para su construcción se deja enterrado en el terreno, o bien aquellos en que se produce a su recuperación.

A continuación se describirán los pilotes de concreto usados en nuestro medio.

- 1.- Pilotes fabricados "in situ" en tubos recuperables  
(Pilotes Franki)
- 2.- Pilotes perforados  
(Pilotes Rodio)
- 3.- Pilotes prefabricados de concreto armado e hinchados
- 4.- Pilotes pretensados.

## 1. PILOTES FABRICADOS "IN SITU" EN TUBOS RECUPERABLES

### PILOTES FRANKI

El pilote Franki fue ideado y utilizado por primera vez en 1909, en Bélgica, por F. Frankignoul.

En términos generales, la construcción de un pilote Franki consiste en hincar en el suelo un tubo metálico, obstruido en su parte inferior por un tapón de concreto, de manera que se forme una cavidad, la que es llenada de concreto; mientras el concreto se apisona enérgicamente, se retira el tubo progresivamente.

El pilote Franki, así obtenido, está formado por una base ensanchada o "bulbo" además de unas protuberancias a todo lo largo del fuste, proporcionales a la compresibilidad de los estratos atravesados. (ver figura 7).

Para la ejecución de un pilote Franki se requieren las siguientes operaciones:

hinca del tubo

vaciado de concreto de la base ensanchada (bulbo)

vaciado del fuste

Hincado del tubo.- Se utiliza un tapón de concreto seco que obtura herméticamente la parte inferior del tubo este tapón se obtiene vertiendo en el tubo una cierta cantidad de concreto bastante seco, que se apisona enérgicamente con un mazo de 2 a 4 toneladas, cayendo desde varios metros de altura.

Bajo la acción continua de golpes repetidos de mazo, el hormigón forma al pie del tubo un tapón cuya base penetra en el terreno y cuya parte superior, fuertemente comprimida contra las paredes de la vaina, la arrastra por rozamiento hasta la profundidad deseada.

La hermeticidad del macizo de concreto impide cualquier entrada de tierra y de agua subterránea en el tubo metálico.

- Formación del bulbo.- Una vez hincado el tubo, se extrae un poco y se le mantiene fijo mediante cables de extracción. Se regula la caída y la frecuencia del mazo para conseguir hundir el macizo de concreto mediante golpes violentos; es necesario vigilar que siempre quede dentro del tubo una cierta cantidad de concreto para evitar cualquier introducción de agua.

Al apisonar, el hormigón se expande y sale del tubo en forma de hongo, llamado "bulbo".

Las dimensiones del bulbo varían según la naturaleza del terreno. En terrenos muy compresibles, el bulbo puede absorber hasta 1 metro cúbico de concreto.

- Vaciado del Fuste.- Se vierte concreto dentro del tubo, en pequeñas cantidades siendo apisonado energicamente mientras que se extrae progresivamente el tubo unos 20 a 50 centímetros.

La cantidad de concreto vertido se mide de vez en

cuando y se asegura siempre por medio de referencias que que de dentro del tubo una cantidad suficiente de concreto para impedir que pueda introducirse dentro del tubo cualquier cantidad de agua subterránea o tierra.

Se obtiene de esta manera una columna formada por una serie de protuberancias que constituye lo que se llama "fuste".

Es necesario indicar que se debe suspender el vaciado de concreto a un nivel inferior de la losa de unión de las cabezas de los pilotes; asimismo, es necesario colocar una armadura metálica, por lo menos en el último metro empleándose generalmente 4 fierros de 1/2" a 5/8" y estribos de 1/4" a 3/8".

Los pilotes Franki pueden ser vaciados hasta una inclinación máxima de 25°. Estos pilotes inclinados deben estar necesariamente armados en toda su longitud a fin de poder absorber los esfuerzos oblicuos a que están sometidos.

En terrenos arcillosos, los pilotes Franki no se hincan por compresión, sino por extracción de muestras del terreno (pilotes Franki perforados).

La ejecución de estos pilotes Franki perforados se efectúa por medio de un martinete Franki ordinario y de una campana formada por dos mandíbulas semicilíndricas (ver figura) N° 2. Se extrae así un testigo de arcilla de alrededor de 1 metro de longitud.

## 2.- PILOTES PERFORADOS

La diferencia entre un pilote moldeado y un pilote perforado, es que la perforación se realiza con extracción de tierra.

Los distintos tipos de pilotes perforados se diferencian entre ellos por el sistema de compactación del concreto, por ejemplo; compactación por aire comprimido, compactación mecánica. Del primer tipo de éstos, es el pilote Rodio.

Se perfora el suelo con una sonda y se introduce por rotación en la perforación, los elementos de tubos metálicos de 35 a 45 cms. de diámetro para llegar al nivel deseado.

Se introduce la armadura metálica con la ayuda de una cuchara especial; cuando la cuchara llega al fondo, se abre la válvula y sale el concreto de forma que se evita el lavado por agua subterránea; se extrae progresivamente el tubo y se compacta el concreto por medio de aire comprimido.

## 3.- PILOTES PREFABRICADOS DE CONCRETO ARMADO E HINCADOS.

El empleo de estos pilotes de concreto armado data de 1897.

Hennebique los utiliza por primera vez para las cimentaciones de las fábricas de la compañía Babcock-Wilcox.

(Gran Bretaña).

La utilización de estos pilotes se introdujo en Estados Unidos por Raymond. A partir de entonces, este procedimiento no ha cesado de desarrollarse; actualmente, el empleo de pilotes de concreto armado o pretensado está extendido universalmente.

Características Generales.- Los pilotes de concreto armado tienen generalmente forma cuadrada, algunas veces tienen secciones octogonales, hexagonales, circulares y aún anulares. (ver fig. 8)

La longitud normal varía de 6 a 20 metros pero pueden alcanzar los 30 mts. y sobrepasarlos.

Su dimensión transversal varía de 30 a 60 cms., siendo su peso ya considerable para estos últimos casos.

Pueden hincarse verticales o inclinados, siendo la oblicuidad normal del 10% y la máxima de 45°.

Longitud de los Pilotes.- La longitud de los pilotes, depende esencialmente de la naturaleza del terreno en que han de ser hincados y de la carga que deben soportar.

Generalmente, la longitud de los pilotes de concreto no sobrepasa los 20 o 30 mts. y raramente los 40 m. Es necesario disponer de aparatos de sujeción y de hincado apropiados, de lo contrario es necesario proceder al "empalmado", operación que consiste en unir un pilote a continuación de otro.

Se admite como longitud límite, generalmente 35 veces la dimensión transversal menor, pero se puede llegar hasta 50 a 80 veces esta dimensión. Por encima de este límite, los pilotes son demasiado pesados y se emplean pilotes "anulares".

Las armaduras longitudinales de un pilote de sección cuadrada se componen mínimo de 4 barras del mismo diámetro, situados en los ángulos de la sección o de 6 barras, si están dispuestas en un círculo. Deben ser, en lo posible, de una sola pieza o bien uniones con soldadura eléctrica. Para los pilotes muy largos, se pueden emplear empalmes sin ganchos en las condiciones siguientes:

a. evitar situar los empalmes en la misma sección.

Generalmente, se recomienda no empalmar más de  $1/6$  de la armadura.

b. evitar el empalme a una distancia de la cabeza igual a 10 veces el lado.

c. dar a los empalmes una longitud adecuada, 36 a 50 diámetros de la barra.

Las armaduras longitudinales deben calcularse de forma que el pilote puede resistir, además de los esfuerzos estáticos y/o dinámicos de la construcción, los esfuerzos de almacenamiento, transporte y clavado.

En cuanto a la armadura transversal se emplean estribos o zunchos estando más próximos en la cabeza y punta para resistir mejor los golpes del martillo. Para los pi-

lotes cuadrados de gran sección, es preciso unir los fierros situados en el centro de los lados con estribos suplementarios.

Se aumenta la resistencia a la compresión de un pilote reforzando las armaduras longitudinales con armaduras transversales en espiral, lo que se llama "zunchado".

Estos zunchos están formados por barras de 1/4" a 3/8". El paso de zunchado es, en general, de 10 a 15 cms. a todo lo largo del pilote, excepto en las dos extremidades; en donde, el zunchado es más unido (5 a 8 cm), y en una longitud de 2 a 3 veces la dimensión transversal del piloteo. Con la ayuda de un zunchado denso en la cabeza y la punta, se evitan las disgregaciones del concreto sometido a los golpes.

Las principales ventajas de los pilotes prefabricados en taller son: a) hormigonado en moldes horizontales, con lo que es fácil la vigilancia.

b) Su aplicación como pilotes inclinados y de tracción.

c) gran resistencia a la flexión.

d) Gran y adecuado empleo en cimentaciones hidráulicas.

Los inconvenientes son:

a) mayor lentitud en la instalación del pilotaje por el tiempo necesario de fraguado.

b) precisión del previo análisis del terreno para conocer la longitud necesaria de los pilotes.

c) gastos de almacenaje y encofrado de los pilotes.

### Pilotes Pretensados

Puesto que los pilotes están sujetos a esfuerzos de tensión durante el transporte y clavado y bajo ciertas condiciones de servicio, la ventaja del pre-esfuerzo es evidente.

Pilotes de concreto post-tensionados, esencialmente del tipo cilíndrico Raymond, han sido producidos desde 1949 acerca de 1953, los pilotes de concreto pre-tensionado comen- zaron a desarrollarse. Al igual que muchas técnicas y mate- riales de construcción, los pilotes de concreto pre-tensiona- do fueron desarrollados más bien por la industria que por la profesión. Un proceso de tanteos, más bien que un método racional de aproximaciones, fue el empleado durante su desa- rrollo. Actualmente, se ha acumulado suficiente experiencia como para permitir un diseño seguro y económico de estos pilotes.

La experiencia parece indicar que con un pre-es- fuerzo del orden de 49 kg/cm<sup>2</sup> (700 psi) se obtiene suficien- te seguridad durante el manipuleo y clavado en condiciones normales. Mientras que la cantidad de pre-esfuerzos reque- rida varían con el tamaño y forma de los pilotes, el tipo de martillo así como las condiciones del suelo, obviamente no es práctico variar el pre-esfuerzo para cada pilote. Por supuesto, en casos especiales puede ser aconsejable uti-

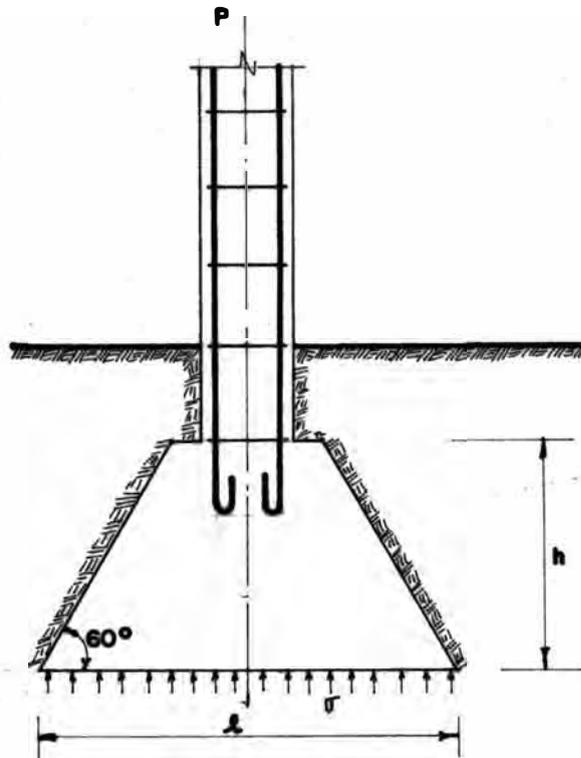
lizar valores más altos o más bajos que 700 psi.

La carga de diseño sobre tales pilotes está basado a menudo en la resistencia última usando un factor de seguridad de 4. Tan alto factor de seguridad **se utiliza** para alejarse de la carga de servicio de tal manera que los esfuerzos de compresión ocasionados por la hincada no sean críticos y por lo tanto se puede desarrollar la capacidad portante por no haberse dañado el pilote.

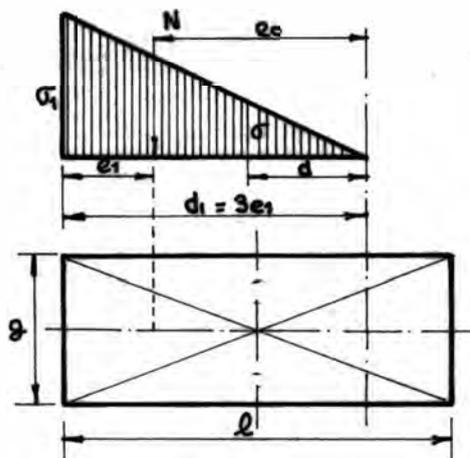
Los pilotes de concreto pre-tensado tienen, sobre los pilotes de concreto armado prefabricados, ciertas ventajas que hacen preferirlos a éstos últimos:

1. Su resistencia al hincado es mayor, el concreto no se cuartea bajo el efecto del esfuerzo de hincado.
2. Existe una mayor protección contra los agentes exteriores.
- 3.-Su acarreo y transporte son más fáciles (izaje en uno o dos puntos), mientras que un pilote equivalente de **concreto armado** requeriría un mayor número de puntos de agarrar.
4. Los pilotes pretensados tienen un momento de inercia mayor que los pilotes de concreto armado de las mismas dimensiones, en los primeros, toda la sección transversal del concreto contribuye al momento de inercia, mientras que en los segundos, la zona de recubrimiento no interviene.
5. Mayor resistencia lateral.





**FIGURA N. 5**



**FIGURA N. 4**

# ZAPATOS DE REFUERZO PARA PILOTES DE MADERA

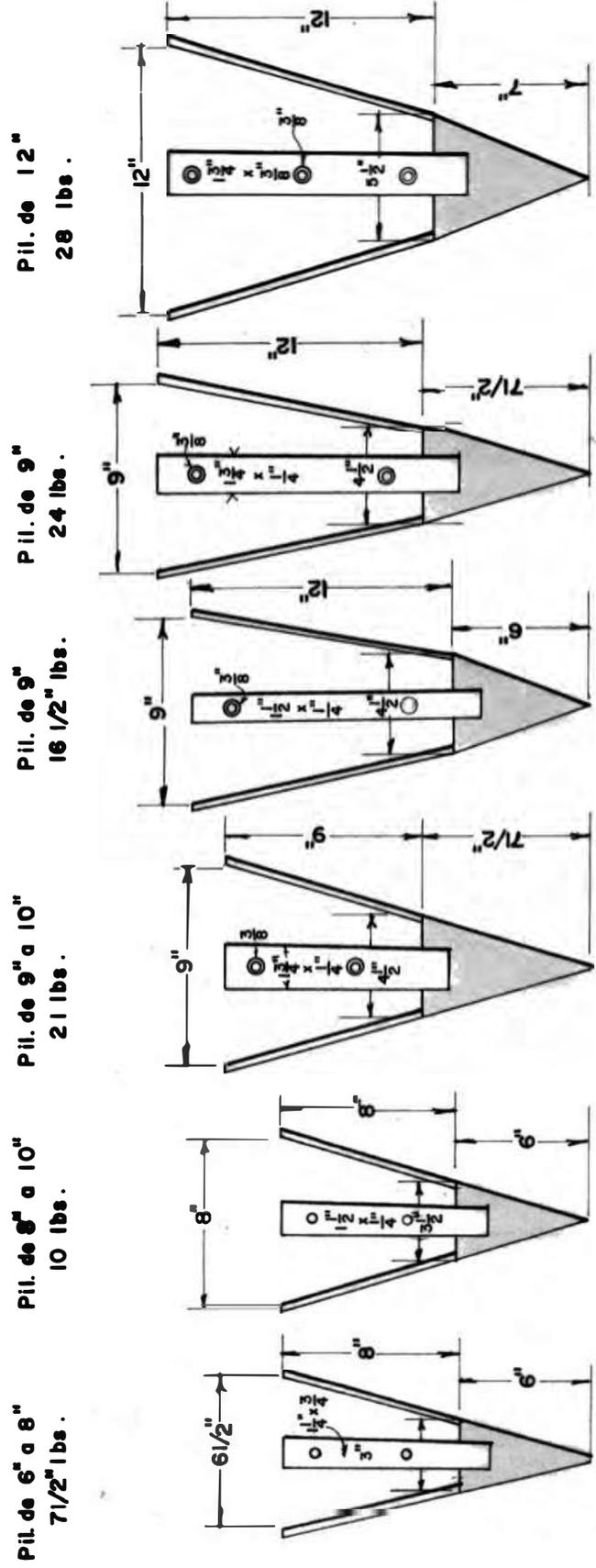
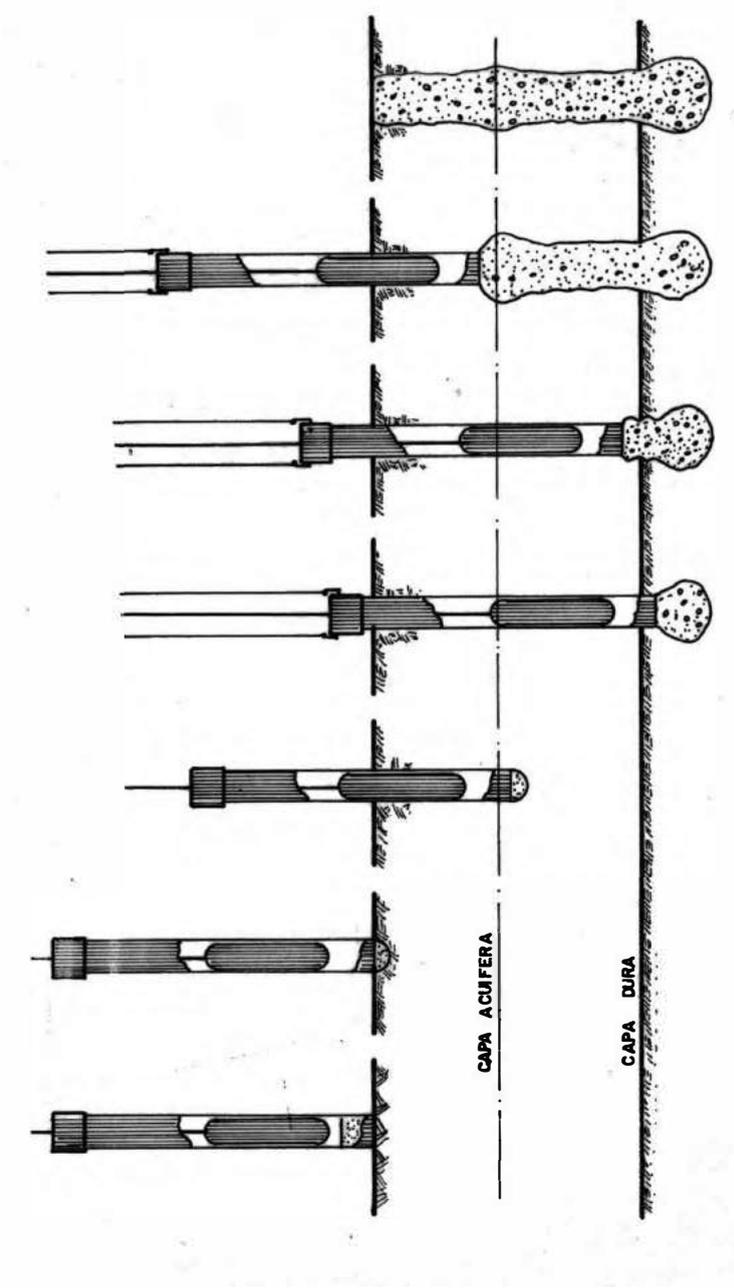


FIGURA 8



**FIGURA No 7**

## CAPITULO II

### ESTUDIO DE MECANICA DE SUELOS

#### GENERALIDADES

Como se supone que ya se tiene unos estudios básicos sobre mecánica de suelos, no se discutirán los detalles de los ensayos de laboratorio sino más bien los diferentes tipos de terrenos que se pueden presentar en el campo y en general los conceptos necesarios con el fin de poder interpretar un estudio de mecánica de suelos y diseñar una cimentación y que así mismo permita preveer su comportamiento cuando haya que utilizarlos para soportar una estructura.

Conociendo el comportamiento de los grupos fundamentales de suelos se puede intuir el de terrenos semejantes

ya que no existen dos suelos iguales, puesto que la naturaleza los ha dotado de consolidación, grado de humedad y propiedades físicas. Si consideramos la tierra como formada básicamente por roca y suelo, se dice que roca es aquel material natural compuesto de partículas minerales tan firmemente unidas que es necesario una relativa gran fuerza para separar las partículas. El suelo puede ser definido como el conjunto de partículas minerales que pueden ser fácilmente separados en pequeños trozos pudiendo contener la masa, aire, agua o materiales orgánicos. Las partículas minerales de la masa del suelo provienen de la descomposición de la roca por intemperismo (viento, agua, hielo) y por procesos químicos.

Se distinguen suelos residuales y transportados, Un suelo es residual cuando ha sido formado en un determinado lugar por descomposición de la roca y es encontrado en el mismo sitio. Es transportado cuando ha tenido origen en un lugar y es localizado en una nueva posición debido a la acción del viento, agua glaciares o fuerzas de gravedad.

#### CLASIFICACION DE SUELOS

1.- Roca Firme.- Es la roca sólida, dura e inalterada en su yacimiento natural que ocupa una extensión indefinidamente grande, no cuarteada por vetas o grietas peligrosas, ni sustentada por otro material distinto de la roca.

Los tipos geológicos del material que compone la

roca firme puede ser los de las rocas volcánicas, sedimentarias y metamórficas. Entre ellas están las areniscas, conglomerados, pizarras y esquistos. La confianza que merecen las dos últimas es problemática, depende de la posición del yacimiento y del grado de meteorización.

2.- Roca Meteorizada.- Es un estado intermedio entre la roca firme y el suelo. Lo normal es que su yacimiento natural esté encima o al lado de la roca firme. Es probable que tenga grietas o hendiduras rellenas de fragmentos de roca e incluso de materiales de tipo arcilloso. Pueden que estén los bloques duros completamente separados por capa de tierra o suelo, es decir, de roca disgregada, en otros casos, la erosión puede haber sido causa del arrastre del material fino.

3.- Brava.- Término comunmente para describir pedazos de roca desde 6 pulgadas máxima hasta 1/4 de pulgada mínimo. Es un material sin cohesión, esto es, que no hay adhesión o atracción nentre las partículas.

4.- Arena.- Partículas minerales más pequeñas que la grava, pero no inferiores a 0.005 o 0.0074 mm. Puede ser fina, media o gruesa dependiendo del tamaño de la mayoría de las partículas. Es un material no cohesivo, sin embargo si está húmedo, la tensión superficial del agua puede dar lugar a una cohesión ficticia que desaparece cuando el material se saca o se satura.

8.- Caliche.- Es un término que generalmente denota gravas, arenas, limos y arcillas cementadas entre sí por sales del desierto, tales como el carbonato de calcio, que han sido depositadas por la humedad ascendente y evaporación.

9.- Tierra Vegetal.- Es una mezcla de arena, limo o arcilla, o una combinación de cualquiera de ellos con algo de materia orgánica -humus- y es el que tiene gran valor en agricultura. Se le llama a veces capa superficial y se distingue del subsuelo porque éste contiene poca o ninguna materia orgánica.

10.- Turba.- Indica un suelo constituido por materia orgánica parcialmente descompuesta que se forma en sitios pantanosos.

11.- Loes.- Generalmente es un material poroso, no endurecido, depositado sin estratificar y del tamaño del limo.

12.- Bentonita.- Es un producto de la descomposición de cenizas volcánicas. Posee montmorillonita en grandes cantidades, es en realidad una arcilla sumamente activa.

13.- Fango o lodo.- Es una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos con agua, en estado fluido o débilmente sólido.

Dada la variedad de mezclas, casi infinitas, de los materiales que componen el suelo o terreno se acostumbra a describir algunos de éstos mediante adjetivos que indican la

naturaleza del material secundario más importante. Se utilizan denominaciones tales como arcilla arenosa, arena arcillosa, arcilla limosa, y arcilla con grava.

La figura siguiente se refiere al sistema de clasificación unificado de suelos basado en el análisis granulométrico y en los límites de Atterberg.

### Propiedades de los suelos en la Ingeniería

Las propiedades de los suelos son complejos y variables. Para una aplicación dada en la ingeniería, algunas propiedades son más significantes que otras. Las propiedades ingenieriles más importantes de los suelos pueden ser agrupadas en las siguientes categorías:

- a) Propiedades básicas: peso unitario, razón de vacíos, contenido de humedad, distribución de tamaño de granos.
- b) Resistencia: Especialmente resistencia al corte.
- c) Compresibilidad: Características de consolidación.
- d) Flujo de agua: Características de permeabilidad.
- e) Características de compactación.

### ESTIMADO DE LA RESISTENCIA PERMISIBLE

Será útil en este punto definir los diversos términos relacionados a la capacidad de apoyo y presiones actuantes. Ellos son:

Presión total de sobrecarga.-  $p$ , es la intensidad de la presión total, debido al peso de agua y del suelo en cualquier plano horizontal (fig. 1).

Presión efectiva de sobrecarga.-  $p_o$ , es la intensidad de la presión intergranular en cualquier plano horizontal, Esta presión es la presión total de sobrecarga ( $p$ ) menos la presión de agua de los prosos, la cual, en el caso general, es igual a la presión de agua situada encima del plano horizontal. Por ejemplo, para un nivel de cimentación a una profundidad  $h$  debajo de la mesa de agua:

$$P_o = p - r_w h$$

Presión total de la cimentación.-  $q$ , es la intensidad de la presión total sobre el terreno que entrega la cimentación después que la estructura ha sido construída y totalmente cargada.

Presión efectiva de la cimentación.-  $q_n$ , es el incremento neto en presión que la cimentación transmite al terreno. Este término es usado para calcular la distribución de esfuerzos a cualquier profundidad debajo del nivel de cimentación:

$$q_n = q - p \text{ (a una profundidad de cimentación } D)$$

Resistencia última del terreno,  $q_f$ , es el valor de la intensidad de la carga a la cual el terreno falla en corte.

$$q_{nf} = q - p \text{ (a una profundidad de cimentación } d\text{)}$$

Resistencia supuesta del terreno.- es la intensidad de carga neta considerada apropiada para un tipo particular de terreno para propósitos preliminares de diseño. Los valores particulares están basados en la experiencia local o por cálculo de pruebas de resistencia o pruebas de carga en campo usando un factor de seguridad contra una falla por corte.

5 Resistencia permisible del terreno.-  $q_a$ , es la máxima intensidad neta permisible por el terreno en cualquier caso, tomando en consideración la capacidad portante, asentamientos y de la habilidad de la estructura para acomodarse a los asentamientos.

Es por lo tanto una función del terreno y de las condiciones estructurales.

El uso de los términos arriba mencionados pueden ser ilustrados con los siguientes pasos:

"Cálculos basados en la resistencia al corte de un suelo mostraron que la resistencia última del terreno para un ancho de cimentación de 1.20 m a una profundidad de 1.50 m fue 6 kg/cm<sup>2</sup>. Adoptando un factor de seguridad de 3 sobre este valor la resistencia supuesta del terreno es 2 kg/cm<sup>2</sup>. Sin embargo en vista de la sensibilidad de la estructura a los efectos de pequeños asentamientos diferenciales, se decidió limitar los asentamientos totales y diferenciales adoptando una resistencia permisible de 1.5 kg/cm<sup>2</sup>.

Cuando una carga es aplicada a una cimentación, se producirán asentamientos en la forma mostrada en la gráfica carga-asentamiento de la siguiente figura:

Hasta cierto estado, el asentamiento de la cimentación será comparativamente pequeño y principalmente elástico (es decir que removiendo la carga, la cimentación prácticamente regresará a su nivel original). Incrementando la carga, el asentamiento se incrementará en una relación desproporcionada hasta que el asentamiento se incrementará notablemente sin demasiado incremento de carga. La resistencia última del terreno ( $q_f$ ) habrá sido alcanzada y la cimentación se asentará y se inclinará acompañado de un levantamiento del terreno circundante. (fig. 3)

Como se puede apreciar en la figura anterior, una masa de suelo debajo de la cimentación se mueve a lo largo de un camino curvo, la forma del cual depende de la profundidad (D) y dimensiones de la profundidad (B) y de la cohesión (C), y ángulo de fricción interna del suelo ( $\phi$ ). Terzaghi derivó su ecuación general asumiéndose un camino como el indicado en la figura para una cimentación superficial corrida definiéndola como aquella cimentación en que la profundidad (D) es igual o menor que su ancho (B).

La ecuación de Terzaghi para falla por corte en una cimentación superficial cuadrada o circular es la siguiente:

Resistencia última,  $q_f$

$$q_f = 1.3 C N_c + P_o (N_q - 1) + 0.4 B N_y + p$$

Resistencia neta última,  $q_{nf}$

$$q_{nf} = 1.3 C N_c + P_o (N_q - 1) + 0.4 B N_y$$

donde,  $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_y$  son constantes que dependen del ángulo de resistencia interna del suelo y que pueden ser encontrados en un texto de Mecánica de Suelos (fig. 4). El resto de términos ya han sido explicados anteriormente.

En el caso de cimentaciones profundas (incluido sótanos, columnas con pedestales y pilotes), Terzaghi introduce otros factores adicionales a tener en cuenta, la fricción a lo largo de los lados de la cimentación y los esfuerzos de corte a lo largo de otras fronteras de suelo adyacentes a la cimentación. Entonces en la fig. 5 la fórmula general para una cimentación profunda es:

$$Q^d = Q_{pr} + \text{base } f_s D$$

donde:  $Q_{pr}$  = resistencia de la base calculada según la ecuación anteriormente expuesta.

$f_s$  = fricción lateral entre suelo y cimentación.

$A_{base}$  = área lateral de la base

= 2 para cimentación circular

=  $8r$  para cimentación cuadrada

$D$  = profundidad de cimentación.

Los valores de  $f_s$  dependen del material de la cimentación y de las características del suelo.

Meyerhaf ha demostrado que las ecuaciones generales de Terzaghi son conservadoras puesto que simplifica fuerzas

de corte tanto en el análisis de cimentaciones superficiales como en cimentaciones profundas. Actualmente tienen más aceptación las fórmulas conservadoras de Terzaghi para cimentaciones en gravas, arenas y suelos C-0, es decir, gravas y arenas que tienen una porción fina de limo y arcilla debido a la dificultad de obtener muestras satisfactorias de suelos friccionantes.

Las fórmulas de Meyerhaf son muy idénticas a los de Terzaghi, con la diferencia de que  $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_r$  en vez de depender únicamente del ángulo de fricción interna ( $\phi$ ). También lo son de la profundidad, forma de la cimentación y rugosidad de su base. Meyerhaf recomienda que los valores apropiados de  $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_r$  (fig. 6) deben ser multiplicados por un factor de fama empírico. Hay una diferencia para cimentaciones "enterradas" y "clavadas".

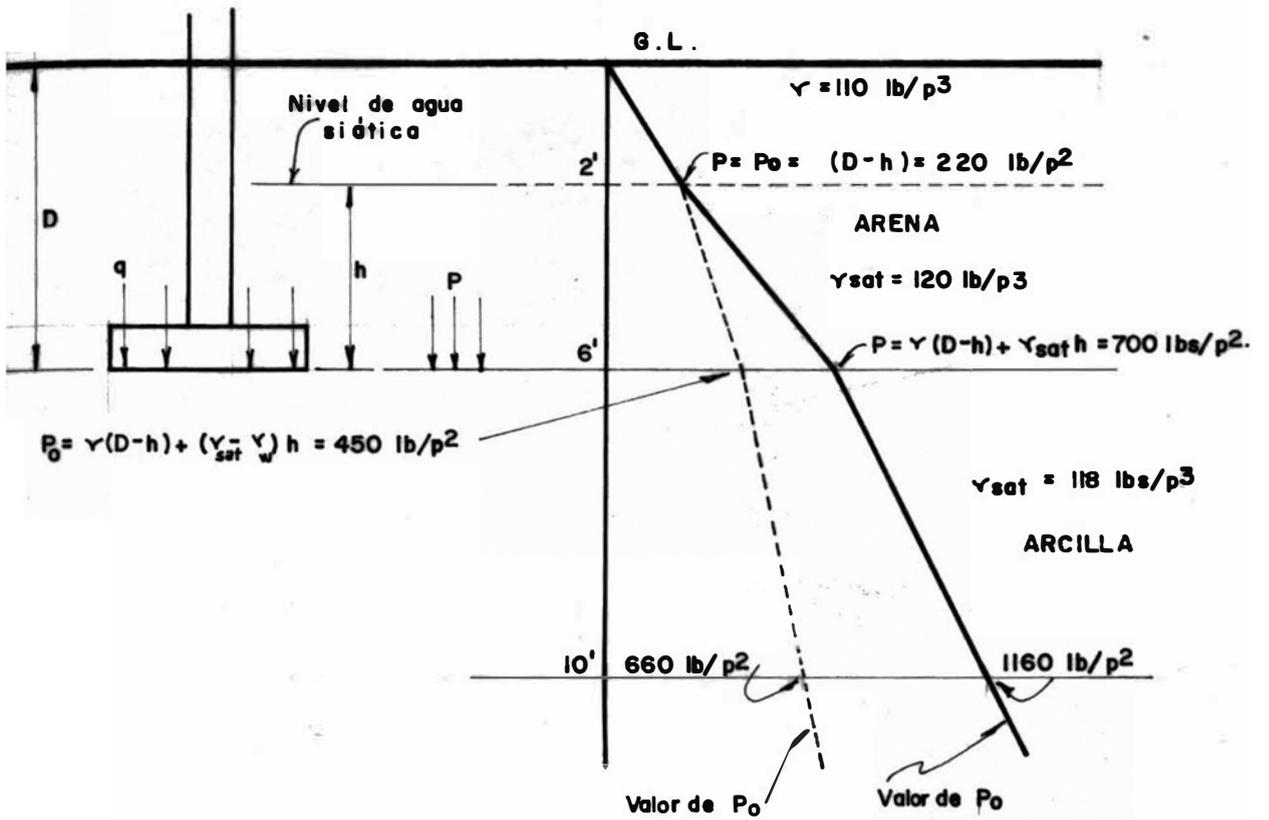
La ecuación general de Terzaghi para suelos friccionantes ( $C = 0$ ), es decir, arenas y gravas se convierte en:

$$q_{nf} = P_o (N_q - 1) + 0.4 BN \quad \text{para cimentaciones circulares y cuadradas.}$$

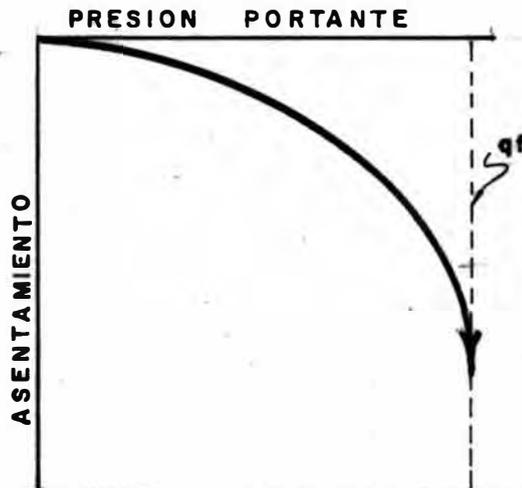
para suelos cohesivos suponiendo que sean totalmente cohesivos, es decir, que el ángulo de fricción interno del suelo sea igual a cero la capacidad neta última se obtendrá con:

$$q_{nf} = CN_c$$

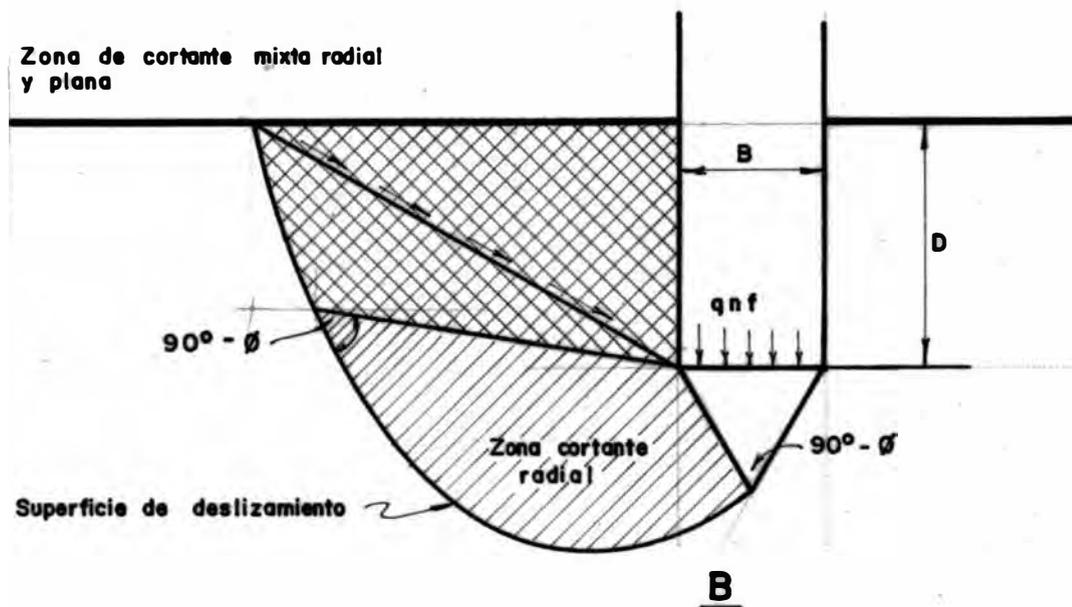
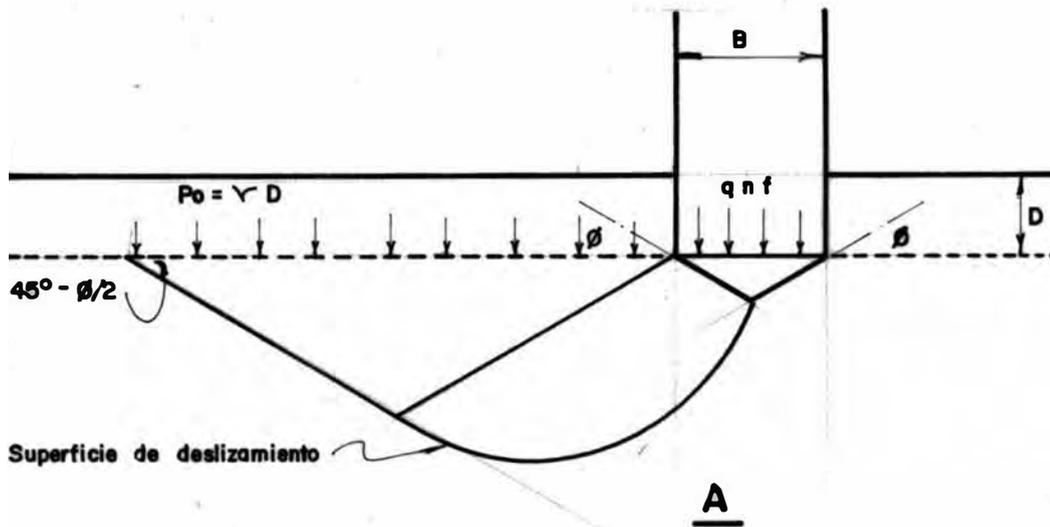
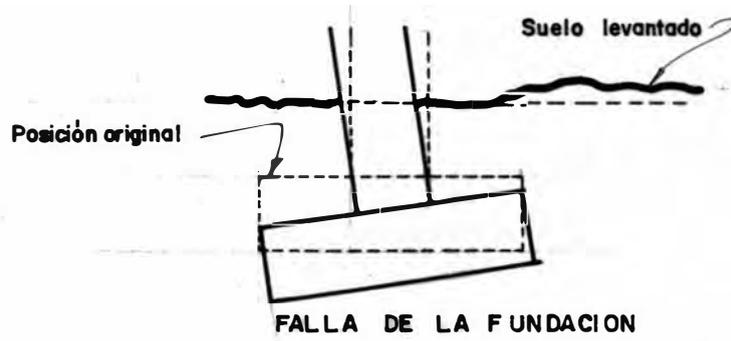
En el siguiente capítulo se indica la forma de calcular los diferentes valores de  $N_c$ ,  $N_q$  y  $N_y$  por medio de la prueba de penetración standard que permite obtener el ángulo



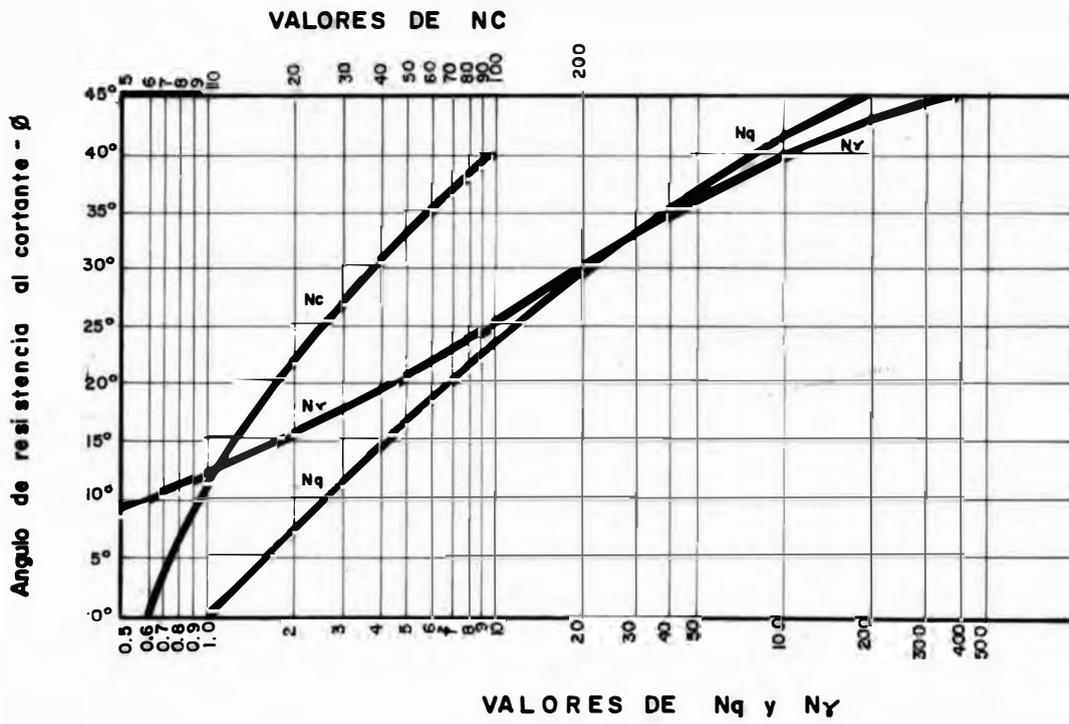
**FIGURA No. 1**



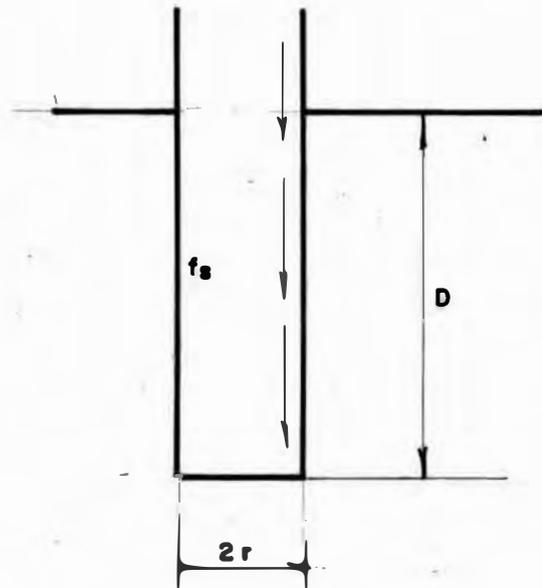
**FIGURA No. 2**



**FIGURA N.º 3**



**FIGURA No. 4**



**FIGURA No. 5**

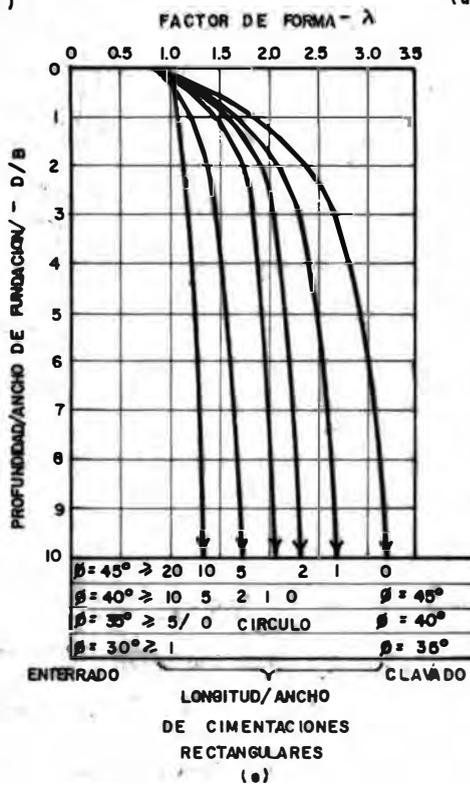
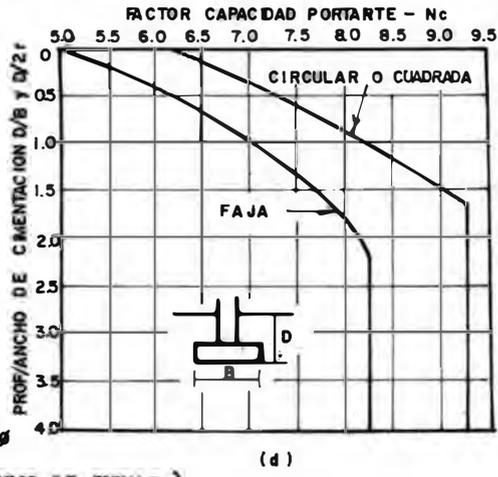
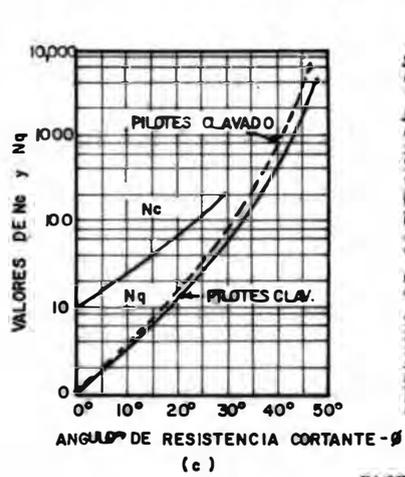
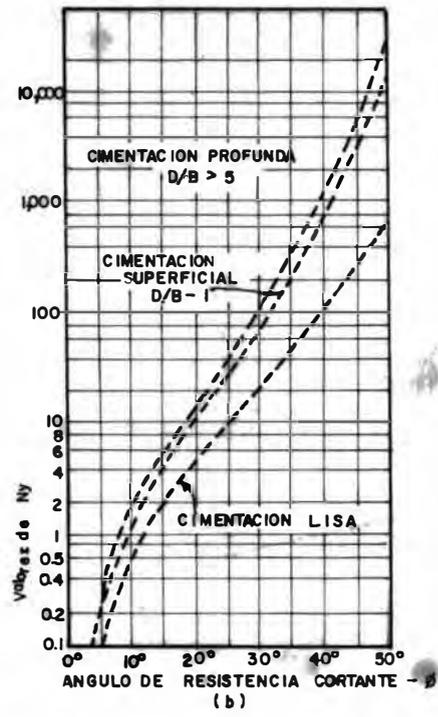
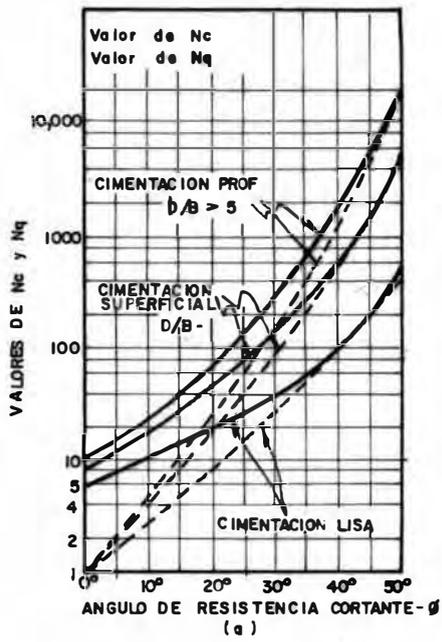


FIGURA No. 6

Ø y que para muchos propósitos prácticos es suficientemente aproximado.

En cuanto a la selección del valor c, éste debe ser hallado en laboratorio y requiere de criterio y experiencia debido a que se presenta en grandes dispersiones para un mismo depósito de suelo.

### ESTUDIO DE MECANICA DE SUELOS

El Estudio de Mecánica de Suelos que a continuación se describe fue ejecutado por la Firma LAGESA con el objeto de conocer las características de los suelos en el área donde se está construyendo la ampliación de la Refinería de Petróleos del Perú (Talara- Piura.)

### ESTUDIOS DE CAMPO

Se llevaron a cabo tres perforaciones de 20 m. de profundidad cada una. Estas fueron hechas a máquina avanzando la perforación por un sistema rotativo y forrando la cavidad con una tubería o "casing", hasta la máxima profundidad de penetración.

En todas las perforaciones se llevaron a cabo pruebas de penetración standard. En esta prueba, un martillo de peso conocido se deja caer desde una altura de 30 pulgadas sobre un tubo metálico o "cuchara" de dimensiones establecidas. El número de golpes necesario para introducir la cuca

ra en una longitud de 12 pulgadas dentro del suelo, al nivel del ensayo, es conocido como el valor N de preparación standard.

El nivel estático de la masa de agua subterránea, o napa freática, fue observado en todas las perforaciones después de 24 horas de concluida la exploración ensayos y muestreo.

La ubicación de las perforaciones en planta se muestra en la Figura Nº 6. Los perfiles de los suelos encontrados se presentan en las figuras 7a, 7b, 7c, donde se describen los suelos hallados a distintos niveles; así como los valores N determinados en los suelos de penetración standard.

Los resultados de las pruebas de penetración se muestran en forma gráfica en la Figura Nº 8 como función de la profundidad de perforación.

#### ESTUDIOS DE LABORATORIO

Las muestras de suelos obtenidos en el campo, fueron analizadas en el Laboratorio con el fin de determinar sus propiedades índice. Las propiedades índice se usan para establecer la clasificación de los suelos encontrados y de ese modo correlacionar los distintos estratos con las constantes físicas necesarias para resolver problemas prácticos. El método de clasificación empleado es el sistema de Clasificación Unificada de Suelos, el cual como varios otros sistemas de clasificación está basado en dos propiedades de los suelos:

- a. Características de granulometría
- b. Características de plasticidad o consistencia

Las características de los suelos encontrados, así como su clasificación, se muestran en los cuadros resumen que se presentan en las Figuras Nos. 9a, 9b. 9c/

#### CARACTERISTICAS GENERALES DE ESTRATIGRAFIA

Los resultados de los estudios de campo y de laboratorio han permitido establecer que en el área estudiada, la estratigrafía consta esencialmente de los siguientes estratos:

- a. Desde la superficie del terreno hasta una profundidad promedio de 16.0 metros se encuentra un estrato de arena fina, limosa, de color gris. La densidad relativa de la arena es baja en los primeros 3.0 metros de profundidad y aumenta a una densidad relativa mediana hacia abajo (SM). (La veracidad de los resultados de penetración del peso PE-1, parece haber sido disminuída porque se reporta a condiciones de fricción excesiva en el cable que accionaba el martillo, lo cual fue corregido en los siguientes ensayos de los pozos PS-2 y PS-3. La graduación de la arena se encontró mayormente uniforme).
- b. Por debajo de la profundidad promedio de 16.0 metros y hasta la máxima profundidad de exploración (20.0 metros). Se encontró una capa de arcilla plástica con granulometría

muy fina y límites de consistencia elevados (CH).

- c. La profundidad del nivel estático de la napa freática fue encontrado dentro del rango 0.9 a 17 metros por debajo de la superficie natural del terreno.



## CAPITULO III

### ELECCION DEL TIPO DE CIMENTACION

De la observación de los resultados de los estudios de campo y de laboratorio indican que en el área estudiada y hasta una profundidad de 3.0 metros por debajo de la superficie natural del terreno, se encuentra una arena muy fina, limosa, con densidad relativa baja y que, por debajo de esa profundidad, la densidad relativa de la arena aumenta alcanzando un grado mediano.

En consecuencia, se pueden considerar las siguientes alternativas de cimentación.

#### Cimentaciones de tipo superficial

Para el diseño de cimientos corridos, zapatas aisladas, zapatas combinadas o plateas de cimentación, se podrán

usar los siguientes valores de capacidad soportante de suelos.

<u>Profundidad(metros) por debajo del piso terminado</u>	<u>Presión admisible ig/cm<sup>2</sup></u>
1.0	0.25
2.0	0.50
3.0	1.10
4.0	2.60
5.0	3.10

La adopción de un tipo de cimentación superficial requerirá para profundidades mayores de 1.0 metro el suministro de un sistema efectivo de drenaje del área del tipo "well point", que permita llevar a cabo las operaciones constructivas.

Si se usa una platea de cimentación, se supone que las cargas se distribuyen en forma prácticamente uniforme en toda la superficie ocupada por la platea. Si las distintas partes de ésta soportan presiones unitarias muy distintas, se recomienda establecer juntas de construcción en los bordes de cada una de las partes. A pesar de que las presiones admisibles recomendadas son adecuadas para cargas estáticas, será imposible garantizar la no ocurrencia de asentamientos diferenciales apreciables entre las distintas zonas de las estructuras bajo la acción de cargas dinámicas, ya que en presencia de materiales granulares sueltos junto con la ocurrencia de la napa freática cerca de la superficie, son factores concurrentes que se conjugan para propiciar la ocurrencia de asentamientos desiguales ante las acciones de tipo di-

námico, lo cual resulta muchas veces en una performance estructural inadecuada.

### Cimentaciones de tipo profundo

Dentro de este tipo de cimientos se comprende a los pilotes y caissons.

Sobre la base de los resultados de los estudios de campo y de laboratorio se han determinado los valores de los parámetros de diseño relativos a la resistencia al corte de los suelos encontrados, que aparecen en la Figura Nº 10 y que han servido para establecer las curvas de diseño de pilotes que aparecen en la misma figura. Estas curvas son de dos clases:

Los factores  $F$  que dan la resistencia por fricción lateral de los pilotes y

Los factores  $E$  que proporcionan la resistencia de punta.

Las ecuaciones de diseño se dan junto con las figuras. Es importante tener en cuenta que estas curvas han sido calculadas expresamente para este caso y su aplicación en otros casos no es recomendable. La aplicación de las ecuaciones es sencilla y está basada en un método de tanteos. El diseñador escoge inicialmente un pilote con determinadas características de parea transversal y perímetro. Para una profundidad inicial, la capacidad de carga del pilote se define con la ecuación dada en la figura. Si la capacidad

obtenida es insuficiente, se puede aumentar la profundidad de penetración o las dimensiones transversales del pilote.

Es conveniente tener en cuenta que, si bien aumentando las dimensiones de la sección transversal del pilote, se puede conseguir un aumento importante en la capacidad de carga, por otra parte la resistencia al clavado en suelo grnulares aumenta ostensiblemente, pudiéndose llegar al caso de requerir un martillo de alta energía de clavado, o que una vez conseguido ésto, la integridad estructural del pilote que de dañada.

En el caso de que se trata; es de esperar que la resistencia al clavado no sea excesiva, especialmente si se usa un martillo con una energía mayor de 20,000 lb/pie. Sin embargo, si se encontrara excesiva resistencia se podrá usar chorros de agua a presión para facilitar el clavado, auque en este caso el uso del chorro se debería limitar a los dos tercios superiores de la penetración requerida.

Las curvas de diseño proporcionadas tienen incluido un factor de seguridad de 2.0.

La separación mínima de pilotes en planta debería ser como mínimo 2.5 veces el diámetro del pilote.

La alternativa del uso de pilotes tiene la ventaja de que las cargas son transmitidas a estratos profundos, los cuales estarían exentos de la ocurrencia de asentamientos diferenciales por acción de cargas dinámicas.

## CAPITULO IV

### PRINCIPIOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL

#### GENERALIDADES

Los pilotes deben ser capaces de resistir sin presentar daños:

- a) Aplastamiento bajo la carga **vertical** de diseño permanente.
- b) Aplastamiento debido a la fuerza de compacto durante el hincado.
- c) Esfuerzos **flexionantes** que ocurren durante el manejo.
- d) tensión debida a la subpresión o al rebote durante el hincado.
- e) Esfuerzos flectores debidos a fuerzas horizontales.
- f) Esfuerzos flexionantes debidas a la localización **excéntrica** del pilote en relación con la carga aplicada.

- g) Esfuerzos flectores debidos a la curvatura en el pilote.
- h) Acción de columna a para las porciones que no reciben apoyo lateral del terreno, pero auto-estables en aire, agua o fango muy licuado.

Los pilotes deben también proporcionar suficiente área de superficie, en el caso de pilotes de fricción, para transmitir la carga del pilote al suelo.

La capacidad de soportar carga de un pilote puede ser generalmente mejor determinada por la habilidad del suelo para soportar las cargas del pilote que por la resistencia estructural del pilote; o por la habilidad para resistir el manejo o hincado, pudiendo ser éstos últimos, factores determinantes.

Las porciones de pilotes no apoyados lateralmente deberán ser proyectadas como columnas largas de acuerdo con los reglamentos normales. Si se provee de apoyo lateral adecuado se proyectarán como columnas cortas.

Para el primer caso, las condiciones de extremo teóricamente tienen un gran efecto sobre la capacidad de la columna. Es una práctica general la estimación del punto de fijación absoluta de las porciones empotradas de los pilotes (ver fig. 1).

Para el caso de pilotes de cimentación es difícil determinar el grado de fijación en el tope, lo cual depende del tipo de conexión, magnitud de la carga, rigideces relativas en la plataforma y del pilote.

Apoyo lateral y pandeo.- El soporte lateral proporcionado por prácticamente cualquier suelo excepto los más suaves o fluídos, ha sido, por lo general, suficiente para evitar fallas en los pilotes a causa del pandeo de las porciones empotradas. Para las porciones no apoyadas en los pilotes, ya sea en agua o sobre el terreno, los pilotes deberán ser diseñadas como columnas largas bajo cargas directas, a no ser que se presenten fuerzas laterales, en cuyo caso el diseño debe ser tal que resistan a éstas también.

Deberá revisarse el pandeo en los pilotes que se extienden a través de agua, fango o arcilla suave incapaz de soportar cargas, transmitiendo la carga como columnas sobre roca en fricción en la porción inferior.

Se ha desarrollado una teoría para cubrir el pandeo de pilotes que tengan imperfecciones iniciales, pero ninguna para pilotes que contengan esfuerzos debidos a la curvatura durante el hincado.

El empleo de pilotes inclinados alrededor de un grupo de pilotes en suelo suave, duplicará aproximadamente los valores de carga críticos.

El pandeo de pilotes en el suelo es por lo general una preocupación solamente para cargas estáticas, ya que el suelo no ha tenido tiempo para ceder de modo lateral en un mayor grado bajo un golpe instantáneo de hincado o cargado transitorio.

Los siguientes ejemplos indican que tan poco apoyo

lateral basta:

- a) En Gothenberg, tubos de 5 a 7.5 cm de diámetro y 39 m. de largo fueron cargados a prueba hasta el límite elástico aparente del acero.
- b) en el Potomae River Bridge, pilotes H (35 cm, 51 kg/m) de 64.5 m. de largo, hincados a través de 30 m. de fango suave de río hasta lograr rechazo a los 57 m, soportaron durante 6 semanas una carga de prueba de 200 ton, sin que se presentaran tendencias visibles al pandeo.
- c) En Houston, Texas, pilotes H (30 kg/m) de 30 m. de largo, hincados a través de 18 m. de terreno suave y 3.6 cm de arcilla dura, con los topes expuestos al cabeceo de un muelle, fueron probados con 100 ton durante un año sin que se presentaran signos de pandeo.

Efecto de curvatura y fuera de plomo.- Ningún pilote es capaz de mantenerse enteramente a plomo o recto. Cualquier curvatura o fuera de plomo provoca esfuerzos flexionantes. Una excepción sería los pilotes rectos que tuvieran inclinaciones opuestos bajo una zapata común, en cuyo caso actúan como un marco en A.

La posibilidad de desviaciones en el alineamiento de pilotes largos de madera o pilotes H en el suelo, es generalmente ignorada, a no ser que sean visibles las desviaciones durante o después del hincado. No se pueden hacer inspecciones en los pilotes sólidos y por lo general, se les permite (a los pilotes) soportar cargas completas de diseño.

Pruebas llevadas a efecto en una obra en Detroit por el Engineering Research Institute de la Universidad de Michigan, mostraron resultados satisfactorios en pilotes con curvaturas" de escoba" y se concluyó que el apoyo lateral proporcionado a los pilotes hincados en la masa del suelo fue suficiente para contrarrestar la excentricidad desarrollada por el alejamiento del alineado vertical.

Se han anotado muchas pruebas logradas sobre pilotes encorvados y parece general conceder que la capacidad estructural máxima es igual o mayor que la carga de trabajo multiplicada por el factor de seguridad requerido. La habilidad de los pilotes encorvados para soportar cargas significativas de modo satisfactorio, se debe al hecho de que los suelos proporcionan sustancial apoyo lateral, de ordinario mayor del necesario para la estabilidad.

Pilotes de Concreto Prefabricados.- Para longitudes cortas y medias normalmente se usan pilotes de sección cuadrada y exogonales, ortogonales o circulares para grandes longitudes, Si las condiciones del suelo requieren de una gran sección transversal se utilizan tubos de concreto prefabricados que posteriormente al clavado sean rellenos de concreto.

Para évitár exceso de esfuerzos y por lo tanto de refuerzo como consecuencia del manejo e hincado. Se aceptan por lo general las siguientes longitudes máximas de acuerdo a la sección transversal.

<u>Tamaño del Pilote</u> (cm)	<u>Longitud máxima</u> (m)
25/25	12
30/30	15
35/35	18
40/40	21
45/45	24

El diseño estructural de pilotes prefabricados de concreto genralmente es gobernado por la necesidad de dar adecuada resistencia contra los esfuerzos producidos por el izaje y manejo de pilotes y posteriormente por el clavado de los mismos.

Una vez que los pilotes han sido clavados hasta su posición final los esfuerzos causados por las cargas llegadas a la cimentación comunmente producen menores esfuerzos que aquellas causadas por el manipuleo y clavado.

El diseño de pilotes para resistir los esfuerzos de clavado han sido analizados por diversos investigadores embebiendo en los pilotes, instrumentos apropiados para medir la magnitud y la velocidad de la onda de esfuerzos, la cual después de cada golpe viaja de la cabeza del pilote hasta la punta en donde es parcialmente reflejada volviendo nuevamente a la cabeza. Los investigadores demostraron que éstos esfuerzos eran superiores a los que se obtenían aplicando las fórmulas dinámicas de clavado. Los esfuerzos de hincado dependían principalmente de la altura de caída del martillo y de la naturaleza del amortiguamiento entre pilote y

martillo. Sus condiciones fueron las siguientes:

- a) La cantidad de acero longitudinal deberá ser calculado según los esfuerzos producidos durante el izaje y manipuleo de los pilotes (los investigadores demostraron que el uso de acero de grado medio no tenía ningún efecto en la resistencia al clavado).
- b) La cantidad de refuerzo transversal, cuando se esperan altos esfuerzos de clavado, no debe ser menor de 0.4 por ciento del volumen total de concreto.
- c) La cantidad de refuerzo transversal cerca de la punta y de la cabeza deberá ser del 1.0 por ciento del volumen total de concreto.

Hay que tener en consideración que las recomendaciones anterioremente expuestas para duras condiciones de clavado. Las siguientes son recomendaciones para esfuerzos normales de clavado, dadas por Códigos de Cimentaciones de los Estados Unidos:

"El refuerzo lateral es de suma importancia para resistir los esfuerzos de clavado y deberá ser colocado en forma de estribos o zuncho y no deberá ser menos que 3/16". Hasta una distancia de 3 veces el ancho en cada extremo del pilote, el volumen del refuerzo transversal no deberá ser menor del 0.6 por ciento del volumen total. En el cuerpo del pilote el refuerzo lateral no deberá ser menor del 0.2 por ciento del volumen total y espaciado a no más de la mitad del ancho del pilote. La transición entre el mínimo es-

paciamiento (en los extremos) y el máximo espaciamento (en el cuerpo) será hecho gradualmente y en una longitud de cerca de 3 veces el ancho.

El recubrimiento de todo el refuerzo no será menor de 1 1/2", pero cuando los pilotes están expuestos al agua de mar o a otras influencias que produzcan corrosión del refuerzo, el recubrimiento no deberá ser menor de 2 pulgadas.

Esfuerzos durante el manipuleo.- En pilotes las cargas de trabajo producen por lo general esfuerzos de compresión directamente y el refuerzo es necesario solamente para propósitos de izaje, excepto cuando los pilotes actúan como columnas o en flexión.

En general, los pilotes deben ser girados (volteados) para remover los de sus encofrados, izados del centro o de 2 o más puntos utilizando cables, levantadas, colocados en posición para transportarlos, descargados, almacenados e izados nuevamente de una posición horizontal a una vertical para el clavado. El método de transporte, con guías, por rieles, por camión o embarcaciones deberá convenirse cuando se diseñen los pilotes.

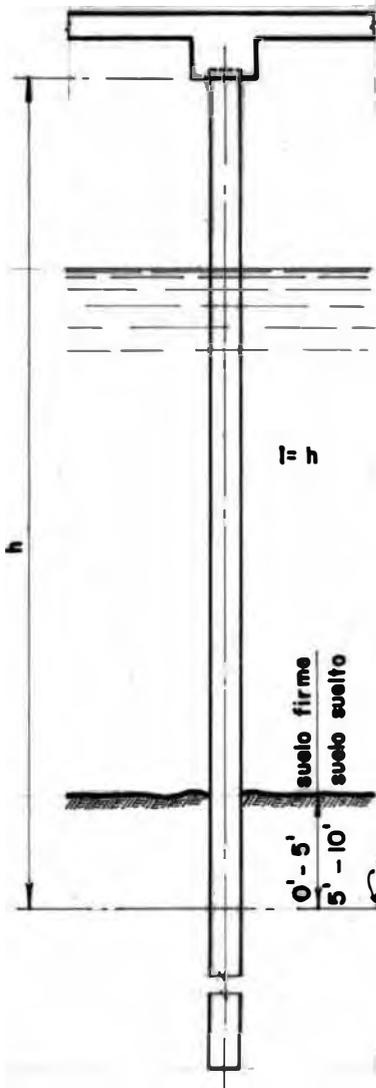
El refuerzo es a menudo el ítem que mayor influencia tiene en los costos y puede ser considerablemente conveída eligiendo de manera apropiada los dispositivos de izaje con el fin de minimizar los esfuerzos del manipuleo. Algunas veces es deseable colocar un ligero exceso de refuerzo para permitir mayor libertad y confianza durante el izaje,

almacenaje y clavado.

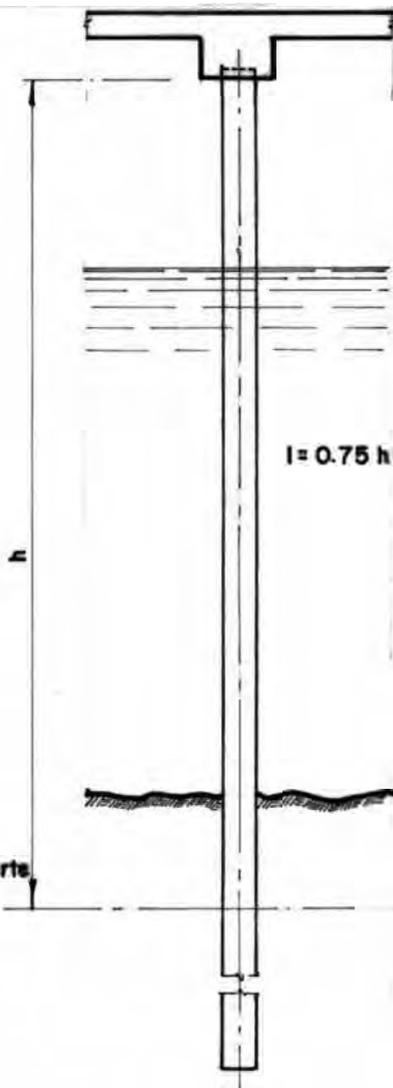
Los pilotes deben ser diseñados, después de haber elegido los puntos de izaje, como una viga o como una viga con extremos en volado. Durante el manipuleo, la secuencia de operaciones puede ser tal que se presenten varias combinaciones de luces como se muestra en la fig. 2 considerando un incremento por impacto que en diseños prácticos varían de 0 a 50, 75 a 100 por ciento.

Si las longitudes de los pilotes son muy grandes, es necesario utilizar más de dos puntos de izaje. La fig. 3 muestra los coeficientes para luces, cortes y momentos con los que se obtienen reacciones iguales a diferencia de la fig. 2 con los que se obtienen momentos positivos y negativos iguales.

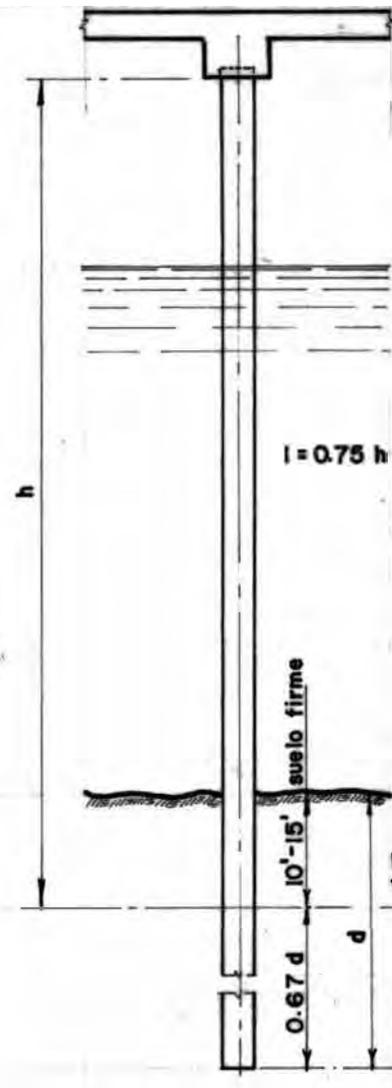
El refuerzo requerido para resistir éstos momentos deberá ser continuo a través de toda la longitud del pilote debido a que los momentos son aproximadamente iguales en casi toda la longitud. Es práctica común desprestigiar la disminución de la sección en los pilotes con punta.



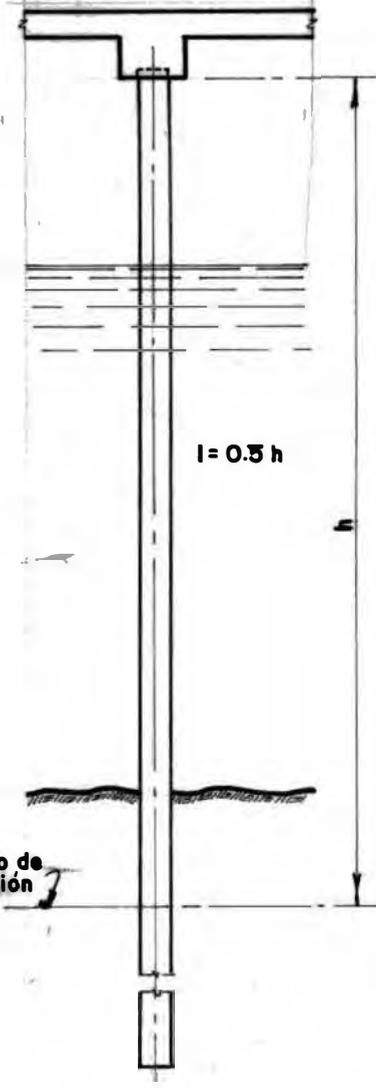
**CONDICION I**  
terminales no fijados



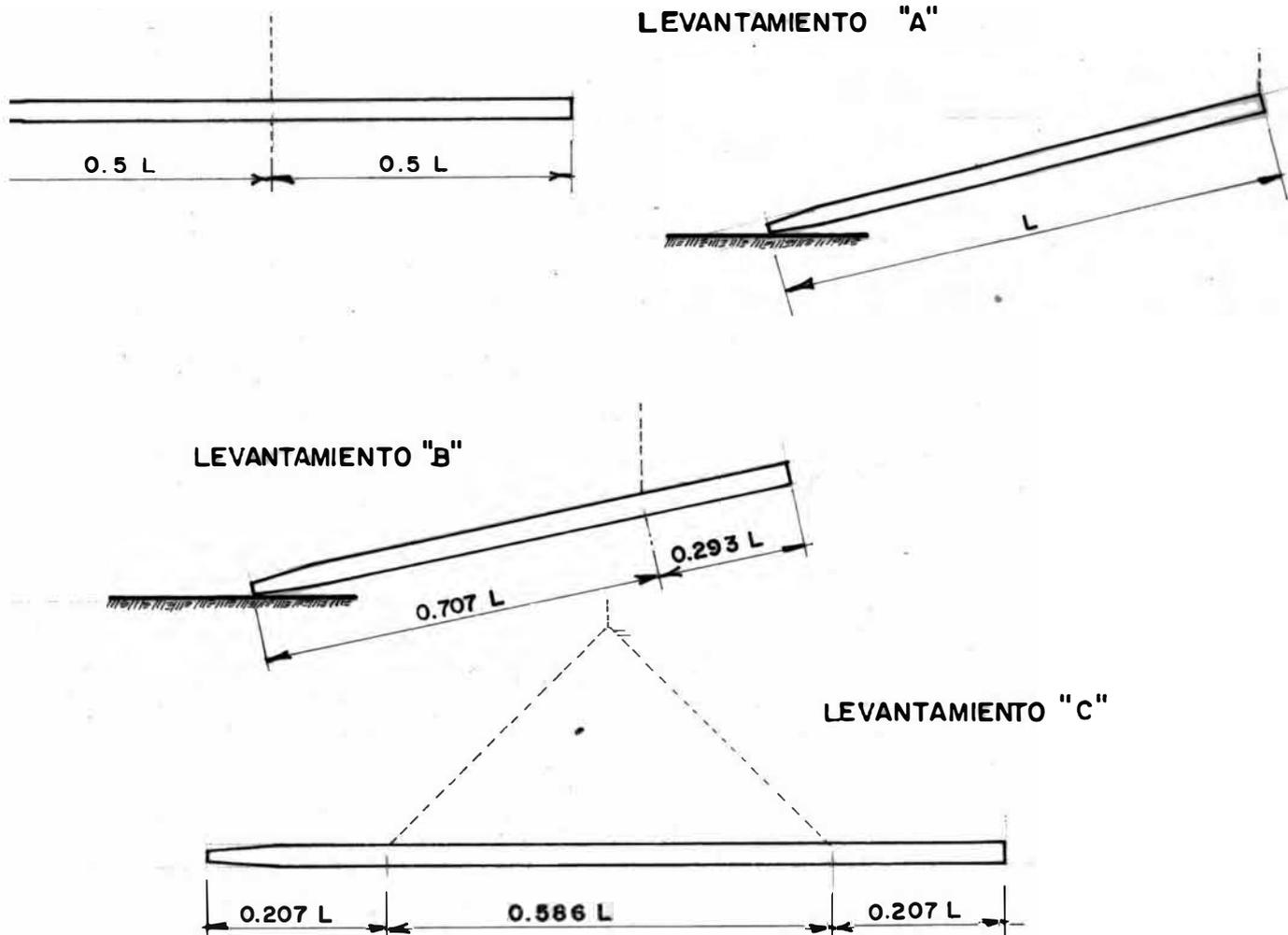
**CONDICION II**  
Superior fijado  
fondo no fijado



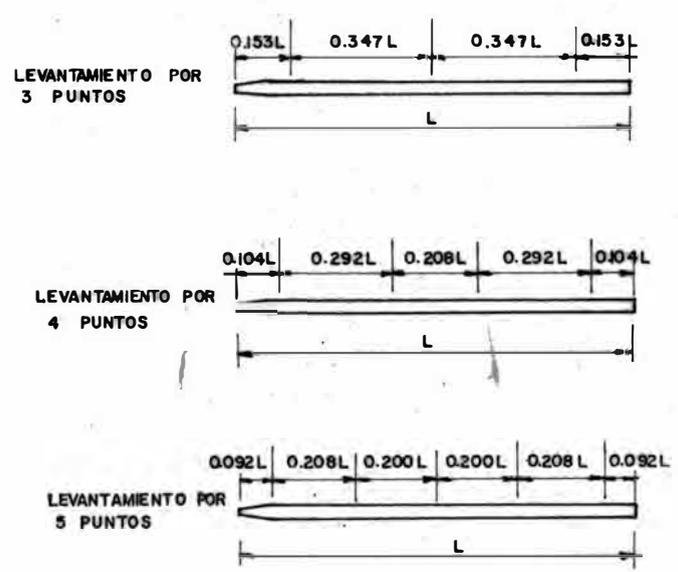
**CONDICION III**  
fondo fijado  
no  
superior fijado



**CONDICION IV**  
ambos terminales  
fijado



**FIGURA N.º 2**



**FIGURA N.º 3**

## CAPITULO V

### CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS PARA PILOTES PREFABRICADOS

Los pilotes de concreto se emplean extensivamente en todo el mundo. Se calcula que anualmente se construyen más de 50 millones de metros lineales de pilotes, lo que permite perfeccionar las técnicas de proyecto, fabricación y colocación para satisfacer los requerimientos de la técnica de cimentación. En Japón por ejemplo, hay 45 plantas que producen más de 1 millón de toneladas de pilotes para cimentación al año, y en U.S.A. se calcula cerca de 2 millones de metros lineales producidos actualmente (1).

(1) ORDOÑEZ

## 1.- TIPOS DE SECCIONES

Las formas más frecuentes de secciones de pilotes se relacionan en la tabla 1, indicando sus principales ventajas e inconvenientes, En todas las reacciones pueden existir aligeramientos e incluso se puede variar la sección a lo largo del pilote.

## 2.- DISPONIBILIDAD

Los pilotes de hormigón prefabricados pueden construirse a pie de obra, o en lugar próximo a la misma, mediante concreto de alta resistencia que se vierte en moldes apropiados. Puede disponerse una fuerte armadura del modo que convenga y dejarla bien arriostrada. Generalmente, los materiales se consiguen sin inconvenientes. Hay que procurarse los medios adecuados para el curado, manipulación y almacenamiento. Cuando el número de pilotes que se requieren resulta insuficiente para justificar el suministro de los moldes y equipos necesarios a pie de obra, o cuando no se dispone de espacio suficiente en el lugar de la misma, puede que no resulte fácil conseguir estos pilotes. Normalmente, los pretensados se confeccionan en fábrica.

FORMA

V E N T A J A S

INCONVENIENTES

Máximo perímetro de fricción con área mínima.  
Costo de fabricación muy bajo.

Resistencia a flexión baja.

El coeficiente perímetro/área es bueno.  
Costo de fabricación bajo.  
Buena resistencia a flexión según los ejes principales.

Aproximadamente igual resistencia a flexión según todos los ejes.  
Facilidad de penetración.

Proyectos superficiales en las caras inclinadas muy difíciles de evitar.

Igual resistencia a flexión para cualquier eje.  
No hay esquinas siendo la apariencia mejor.

Costo de fabricación alto.  
Los defectos superficiales de la parte superior son difíciles de evitar.

Se emplean cuando la resistencia a flexión es mayor en un sentido que en otro.

Es difícil mantener la orientación en la hinca.

La resistencia a flexión según los ejes es grande en relación con el área.

Costo de fabricación: alto.  
Difícil de orientar en la hinca.

Resistencia a flexión muy alta según el eje  $x - x$ .

Costo de fabricación alto.  
Dificultad de orientación.

### 3.- DURABILIDAD

En general, los pilotes de concreto prefabricados totalmente marcados dentro del terreno son muy duraderos. Los pilotes expuestos a la interperie pueden deteriorarse por resquebrajamiento del concreto precisamente a la altura del nivel donde llega el agua, debido a que se disuelven las sales en los pasos, se oxidan las armaduras y le atacan las sustancias químicas del agua del mar. Los ácidos y otras sustancias químicas del terreno también pueden dañar los pilotes que tengan partes metálicas con fines resistentes. Para disminuir la disgregación del material se utilizan cementos especiales, concretos densos y ricos, recubrimientos de las armaduras apropiadas y capas protectoras con productos bituminosos.

Se ha comprobado que unos pilotes prefabricados de sección cuadrada utilizados en mar presentaban finas grietas de reparación visibles en las partes situadas por encima del agua. Esto puede ocurrir en el caso de pilotes muy armados que están sometidos a carga permanente suficientemente grande, puesto que el concreto se acorta durante el fraguado y curado por efecto de la reparación y la resistencia a compresión de las piezas de armadura longitudinal puede sobrepasar la resistencia a tracción del concreto. Es probable que las cargas que comprimen la armadura cierren dichas figuras. Que da por averiguar si por dichas grietas se producirá la corrosión del acero y la ruina del concreto pueden taparse median

te una primera de material bituminoso o de otro tipo adecuado que asegure la estanqueidad. Con el pretensado se evitan este tipo de grietas.

#### 4.- MATERIALES

CEMENTO: Para la confección de pilotes de concreto aramado se emplea normalmente cemento Portland Tipo I y cuando van a estar sometidas a ataques agresivos, por ejemplo presencia de sulfatos se emplea el cemento tipo II. Es recomendable que la dosificación no supere los 400 a 450 kg. de cemento por metro cúbico para cortar peligros de fisuración.

Cuando se usa el cemento tipo II es necesario tomar precauciones especiales como que el agua de mezclado debe estar bien dosificada y el concreto mantenido en estado húme-

La mezcla de concreto debe ser proporcionada para producir una resistencia **última** de  $210 \text{ kg/cm}^2$  en 28 días. No se deberá utilizar un tamaño de agregado grueso mayor de  $1 \frac{1}{2}$  pulgadas ni mayor que los tres cuartos del espacio entre barras de refuerzo. El concreto no deberá contener más de 6 galones de agua por saco de cemento incluida el agua del agregado. Deberá tener 3 a 4 pulgadas de slump y 1 a 2" de slump si se usa vibrador. Los vibradores de alta frecuencia interna darán de 3600-7000 impulsos por minuto. Para evitar cangrejeras sobre todo en las esquinas interiores de los

pilotes octogonales, esta parte del vaciado deberá ser cuidadosamente espaciada, o aún mejor, vibrada con una hoja de 1/4" unida a la carga del vibrador. Las superficies superiores de los pilotes deberá ser acabada con un frotachado con madera mientras la superficie del concreto esté húmeda.

Para las pruebas de compresión por lo menos se tomará un juego por cada 25 pilotes y por cada día de vaciado.

Se podrá usar cemento para obtener un concreto de alta resistencia inicial cuando se requiera un manipuleo y clavado lo más pronto posible.

Las siguientes especificaciones son recomendables cuando se usa concreto en estructuras marinas.

- 1.- No usar agregados reactivos
- 2.- Usar de 6 1/2 a 7 1/2 sacos de cemento por yarda cúbica de concreto.
- 3.- Usar cemento tipo V (tiene alta resistencia a los sulfatos)
- 4.- Usar una relación agua/cemento menor de 6 (es decir, menos de 6 galones de agua por saco de cemento).
- 5.- Usar concreto con aire incorporado en regiones calurosas y frías.
- 6.- Usar un recubrimiento mínimo de 3" para todo el acero de refuerzo.

### ACERO DE REFUERZO

Las varillas de refuerzo se fabrican de acero de lingote en varios grados. También se fabrican varillas volviendo a laminar rieles viejos. Ultimamente, en el país la Empresa Siderúrgica del Perú ha lanzado al mercado el acero grado 60 para barras de construcción.

Es este un caso con capacidad de esfuerzo en fluencia  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$  obtenido por proceso metalúrgico, que cumple con las normas ASTM A 615 - 68 y que son reconocidas por el Reglamento Nacional de Construcciones.

Para pilotes pretensados se utilizan aceros de alta resistencia con un punto de fluencia de aproximadamente  $16,000 \text{ kg/cm}^2$ .

En cuanto a la cantidad de refuerzo mínimo, éste es del orden del 1% al igual que comunas y en número mínimo de 4  $\emptyset$  5/8" para pilotes cuadrados y de 6 5/8" para pilotes circulares.

La armadura transversal, en estribos o en espiral, generalmente es de 1/4" y algunas veces de 3/8" y en varias ocasiones de 1/2".

### ENCOFRADO

El vaciado del concreto en los pilotes se ejecuta en los encofrados preparados previamente en la zona de vaciado especialmente preparada en un patio cerca de la zona de

Fig. 3)

El anclaje de las barras de izaje debe estudiarse para asegurar la adherencia necesaria, generalmente, el diámetro de estas barras es de 5/8" y máximo 1" con  $\alpha = 30^\circ$ .

Un pilote concreto prefabricado de sección cuadrada de 45 cm. de lado y 18 m. de longitud viene a pesar cerca de 10 toneladas. Se requiere un equipo pesado para manejarlo y generalmente también un gran espacio de maniobra. Los pilotes han de ser amarrados con laderas de suspensión o accesorios especiales que eviten una flexión excesiva cuando se levantan de su posición horizontal.

Los pilotes son elevados y transportados de la zona de vaciado a la zona de almacenaje y posteriormente al lugar del clavado. Este transporte se hace generalmente con la ayuda de grúas o de pórticos móviles sobre monorraíles.

## 6.- ALMACENAJE

A condición que la temperatura pase de los  $10^\circ\text{C}$ . (diez grados centígrados); los pilotes de concreto armado con cemento portland normal pueden izarse de la zona de vaciado y transportarse unos días después del vaciado, generalmente 7 días, mientras que se necesitan 28 días de espera para el hincado. Cuando se emplea cemento portland especial para obtener concreto de alta resistencia inicial, dichos períodos pueden reducirse a 3 y 7 días respectivamente. Otra alterna-

tiva es el empleo de un concreto de una resistencia mayor a la requerida.

Cuando los pilotes serán colocados en hilera, los bloques de separación (fig. 5) deben estar alineados para evitar indebidos esfuerzos de flexión.

#### 7.- CLAVADO

Los pilotes se pueden colocar con distintas técnicas como hinca, preparación por agua a presión, con contrapesos, por vibración o por combinaciones de éstas. El método más empleado es la hinca por medio de una masa o martillo que corre por unas guías en cuya prolongación se apoya el pilote como reglas para una buena ejecución se puede citar:

- a) La masa y el pilote deben estar alineados.
- b) La cabeza del pilote debe ser cuadrada y estar lisa y desprovista de armaduras salientes.
- c) Hay que evitar las velocidades excesivas de la masa.
- d) Es conveniente proteger la cabeza del pilote con una amortiguación adecuada, por ejemplo, de 15 a 30 cm. de madera blanda.
- e) Conviene evitar la coacción excesiva para torsión y flexión
- f) Para descalzar conviene abrazar el pilote con una banda de acero o madera y cortar con círculo o una perforada pequeña, para que no se estropee la superficie.

- g) Cuando se hace una preparación o se utiliza inyección de agua o aire a presión, antes de aplicar toda la energía de choque, la punta del pilote debe estar en contacto con el suelo.
- h) Lo más eficiente es emplear una masa pesada, una buena amortiguación y una velocidad de impacto pequeña.

## CAPITULO VI

### MARTINETES DIESEL DELMAG

#### DESCRIPCION

Delmag inventó el primer martinete de explosión del mundo en 1926. Desde entonces, ha suministrado más de 7,000 martinetes Diesel a todos los países del mundo, una sección típica de estos martillos se presenta en la Figura N<sup>o</sup> 1 correspondiente al Delmag D-22.

Son autónomos y no necesitan de vapor, aire comprimido o de energía eléctrica ni el equipo de estos suministros.

Debido al principio de atomización por golpe, que se explicará más adelante, se transmite al pilote la mayor

cantidad de energía posible.

Son relativamente ligeros y esbeltos, lo que significa un ahorro en peso y espacio para el transporte y también el poder utilizar con ellos estructuras y resbaladeras comparativamente ligeras.

Las piezas de impacto están fabricadas con aleaciones especiales y trabajan con segmentos con baño de cromo duro. Estas piezas no tienen bielas, cigüeñales, árbol de levas, ni cojinetes, por lo que existen menos fuentes de averías y menos pérdidas por rozamientos.

La parte superior del cilindro, con mandrinado y pulido excentrico, es rígida y está dimensionada en forma que guía al pistón con inclinación de hasta 45°. La parte inferior del cilindro muy robusta y sin distorsión posible, está protegida contra impactos y golpes de rebote por amortiguadores de goma.

El arranque y manejo del martinete se realiza mediante un mecanismo de disparo y seguridad. Un mecanismo de seguridad cuidadosamente diseñado impide que el pistón quede accidentalmente enganchando por la uña del mecanismo de disparo, durante la hinca.

El objeto de los cabezales es guiar a los pilotes de forma eficaz. Los hay de varios tamaños para pilotes de madera, hormigó o metálicos y para tubos.

El amortiguamiento que puede ser de madera dura o plástico protege la cabeza del pilote.

#### PRINCIPIO DEL FUNCIONAMIENTO

Según el principio de "atomización por golpe", llamado también "pulverización por percusión", el combustible Diesel dosificado, es finamente pulverizado por el impacto del pistón, formándose la mezcla combustible-aire y dando lugar a la explosión. La presión de la explosión por una parte lanza al pistón nuevamente hacia arriba iniciando un nuevo ciclo y por otra impulsa el material de hinca, que aún se halla en movimiento por efecto del golpe, clavándolo más.

En consecuencia, ejercen un efecto triple sobre el pilote: compresión + golpe + explosión, que dan como resultado, la energía total: la energía de compresión ejerce presión sobre la pieza de golpe con el cabezal firmemente apoyado sobre la cabeza del pilote. El golpe a continuación se efectúa sobre el pilote que ya está preparado y preajustado. Como resultado, la cabeza del pilote apenas sufre y la energía del golpe se transmite más eficazmente al pilote, la energía del golpe realiza el trabajo principal y la energía de la explosión, que se produce prácticamente al mismo tiempo ayuda a hincar más el pilote en el terreno.

En resumen, el principio de atomización por golpe o pulverización por percusión consiste en introducir el carbu

rante en la cámara de combustión, en la parte convexa de la pieza golpeadora que forma allí una pequeña laguna (ver sistema de funcionamiento). El émbolo en su caída golpea con su cabeza en la pieza golpeadora, pulveriza el carburante que penetra en la cámara de combustión en forma de fina niebla que al entrar en contacto con el aire altamente comprimido, se inflama.

#### SISTEMA DE FUNCIONAMIENTO

(Ver la Figura Nº 2.

- 1.- El cilindro (1) lleva en su parte superior el émbolo (2) (masa golpeadora) y en su parte inferior la pieza golpeadora móvil (3). El émbolo constituye la parte golpeadora en sí, mientras que la placa de percusión que descansa sobre el pilote solamente transmite el golpe. Esta placa aísla hacia abajo la cámara de combustión. La bomba de inyección y el tanque (4) y (5) están montados en el cilindro. Para el arranque se levanta el émbolo (1) hacia arriba, hasta una cierta altura en que es automáticamente desenganchado. Al caer el émbolo (1) acciona la palanca (6) de la bomba de inyección (4) con lo cual se inyecta el carburante, a aproximadamente 1.5 atmósfera de presión en el patín de la rótula de la pieza golpeante.
- 2a.- El émbolo de su caída debido a su propio peso cierra los

orificios de escape; el aire queda atrapado por delante del pistón y comienza la compresión.

El rápido aumento de presión empuja la pieza de golpe y al cabezal que está inmediatamente debajo, contra la cabeza del pilote antes del golpe (caída libre y compresión).

- 2b.- Al golpear la pieza de golpe con su extremo esférico, el pistón o émbolo hinca el pilote en el terreno y al mismo tiempo atomiza el combustible que se escapa por la cámara anular de combustión (8): el aire a gran presión provoca la ignición de las partículas del combustible atomizadas y la expansión consiguiente de los gases de combustión, actúa en dos sentidos: continúa empujando al pilote que ya estaba en movimiento hincándolo aún más en el terreno y al mismo tiempo lanza al émbolo hacia arriba (impacto + explosión).
- 3.- Al ascender el pistón deja libre los orificios de escape (9) se escapan los gases de la combustión y tiene lugar el equilibrio de presión en el cilindro.
- 4.- A medida que el pistón sigue elevándose, entra aire fresco a través de los orificios, haciendo limpieza o barriendo totalmente y refrigerando el cilindro (10). La palanca de la bomba (5) es liberada por el émbolo y vuelve a su posición inicial, permitiendo la entrada de una nueva dosis de combustible para el nuevo ciclo.

### Energía de Impacto

Por definición, energía es la "habilidad de un cuerpo para producir trabajo". En este sentido, los "cuerpos productores de trabajo" están representados por los martillos Diesel D - 5, D - 12, D - 30, y D - 44. Aún cuando son distintos en dimensiones físicas todos usan el principio de la "atomización por golpe", explicado anteriormente, donde la energía total del golpe está formada por la suma de:

Energía de compresión + Impacto + Explosión.

La suma de estas tres formas de energía permanece constante durante cada ciclo, mientras no se cambie la cantidad de combustible inyectado.

Cada elemento de energía ejecuta un cierto cometido, teniendo cada uno su propia significación: la energía de compresión precarga todo el sistema, compuesto por el bloque de impacto, el cabezal y el pilote de tal manera que prácticamente forman una sola unidad, antes del golpe. Asegura que el subsiguiente impacto se distribuya sobre la mayor sección posible de la cabeza del pilote. Esto reduce la fuerza del golpe por unidad de superficie a un grado menor de lo que es posible con martillos que utilizan otro principio.

La energía de impacto de la masa que cae, normalmente, proporciona la mayor parte de la fuerza de hinca. La combustión comienza en el momento del impacto y la energía de la explosión tiene el objeto de prolongar el de por sí, relativamente corto, impulso de impacto.

La diferencia de tiempo entre el impacto y la explosión tiene la ventaja de dejar que la energía de la explosión desarrolle su máximo efecto en el pilote cuando ya éste ha comenzado a moverse una vez vencido el rozamiento estático. Esto da como resultado un mayor rendimiento del que puede conseguirse con los martillos que no produzcan energía de explosión. Más aún, el efecto del empuje adicional de la explosión, es tal que reduce el peligro de ruptura de pilotes delicados, frente a la tracción (pilotes de concreto). Esto es, debido a que el efecto amortiguador de los gases en expansión se opone a la repentina relajación del pilote después del golpe.

Es interesante notar que la energía del impacto y la explosión se combinan en proporciones distintas para dar la energía total. En pilotes de rápida penetración la mayor parte de la energía que actúa sobre el pilote sale de la explosión. A medida que la hincada se hace progresivamente más dura, comienza a dominar la energía de impacto, como factor predominante y se reduce proporcionalmente la energía de la explosión.

### ELECCION DEL TIPO DE MARTILLO

Al determinar el peso, tamaño y capacidad del martillo, debe tomarse en consideración las características del terreno, así como la relación existente entre el peso del pilote y el del martillo. El impacto será producido por un martillo que debe poseer suficiente energía para superar la inercia del pilote, la fricción pelicular y resistencia elástica, así como peso suficiente para reducir al mínimo la inevitable pérdida de energía durante el impacto.

No es recomendable la utilización de un martillo con un peso útil menor a la cuarta parte del peso propio del pilote; en cambio, los resultados más económicos son los obtenidos con un martillo de peso equivalente al del pilote. Al respecto hay diversas especificaciones como son:

Una energía mínima de acuerdo al peso del pilote, con peso mínimo del martillo relacionado con la sección del pilote, limitaciones derivadas de las fórmulas empleadas, puesto que los martillos tienen una capacidad máxima. En el caso Delmag la fórmula es dinámica. En las consideraciones de abajo las letras tienen la siguiente significación.

$E = R \cdot h$  = energía del golpe del martinete Diesel en Kg  $\cdot$  m.

R = Altura de caída del pistón en m.

Q = Peso del pilote en Kg

S = Penetración media permanente por golpe, resultado de los 10 últimos golpes en mm.

$e$  = Factor de elasticidad en pilote y nulo en mm. para un metro de longitud del pilote.

$L$  = Longitud del pilote en m.

$w$  = Resistencia del suelo contra la penetración  $S$  en toneladas.

La fórmula de hincia Delmag procede de la idea que la energía transferida al pilote por el martinete Diesel  $E.R./(R.Q)$  es igual a la energía  $W.C.L.$  necesaria para comprimir el pilote y el suelo más la energía  $W.S.$  necesaria para la penetración del pilote, entonces:

$$\frac{E \cdot R}{R + Q} = W \cdot C \cdot L + W \cdot S$$

Al hincar un pilote se conocen todos los factores excepto  $W$ , transponiendo la ecuación resulta para la penetración media permanente por golpe de los 10 últimos golpes, la ecuación para la resistencia del suelo:

$$W = \frac{E R}{(e L + S) (R + Q)}$$

A continuación se procederá a derivar dicha fórmula:

1.- Determinación de la energía transferida al pilote.- La energía de golpe del martinete Diesel es la energía cinética del pistón que existe inmediatamente antes del golpe y que se reduce mediante las juntas de dique entre martinete

y cabezal, entre cabezal y pilote, así como de la elasticidad del revestimiento utilizado en el cabezal. La energía restante representa la energía utilizable efectivamente trasladada al pilote.

Según la ecuación de la energía del impacto del martillo Diesel, es igual al peso  $R$  por  $m$  altura de caída  $h$ , entonces:

$$E = R \cdot h \quad (1)$$

El impacto en la fórmula Delmag se admite como dique inelástico porque:

a) El choque de hincas tiene en realidad el efecto de un choque inelástico más que un choque elástico por motivo de las diferentes juntas de choque.

b) El resultado de la fórmula de hincas incluye más seguridad.

Según la ley del choque vale para el choque inelástico la fórmula del mantenimiento de la cantidad de movimiento. De esto resulta lo siguiente si en medio del choque el peso del martillo y el pilote han llegado a la misma velocidad.

$$V (m_1 + m_2) = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

$$\text{Y} \quad V = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} \quad (2)$$

lo cual diciendo que:

$v$  es la velocidad común del peso del martillo y del pilote

en medio del choque.

$m_1$  la masa del peso del martillo.

$v_1$  La velocidad del peso del martillo al rebotar.

$m_2$  La masa del pilote

$v_2$  La velocidad del pilote.

Como el golpe resulta del peso del golpe cayendo libremente, según la ley de la caída libre, la velocidad del peso de golpe al rebotar es la siguiente:

$$V_1 = 2 gh$$

y la velocidad del pilote en este momento es cero:

$$V_2 = 0$$

$V_1$  y  $V_2$  puestos en la fórmula dan la velocidad común del peso del martillo y del pilote en el medio del choque:

$$V = \frac{m_1 \cdot 2 gh + m_2 \cdot 0}{m_1 + m_2}$$

$$V = \frac{m_1 \cdot 2 gh}{m_1 + m_2} \quad (3)$$

La energía útil  $E_N$  del martillo es la energía trasladada en efecto del pilote. Es la energía cinética que existe en el medio del choque:

$$E_N = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v^2$$

al poner  $v$  de la ecuación (3) resulta

$$E_N = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) \left( \frac{m_1 \sqrt{2gh}}{m_1 + m_2} \right)^2$$

$$E_N = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) \frac{m_1^2 \cdot 2gh}{(m_1 + m_2)(m_1 + m_2)}$$

$$E_N = \frac{m_1^2 gh}{m_1 + m_2}$$

Según la definición de la masa  $m_1 = \frac{R}{g}$  y

$m_2 = \frac{Q}{g}$  puesto en la ecuación

de arriba resulta:

$$E_N = \frac{\frac{R^2}{g} \cdot g \cdot h}{\frac{R + Q}{g}}$$

$$E_N = \frac{R^2 \cdot h}{R + Q} \quad (4)$$

Como ya están conocidos la energía del impacto y la energía útil puede averiguarse el rendimiento del impacto para el mal vale.

$$N = \frac{\text{energía cedida } E_N}{\text{energía empleada } E} = \frac{\text{Ecuación (4)}}{\text{Ecuación (1)}}$$

$$N = \frac{\frac{R^2 \cdot h}{R + Q}}{R \cdot h}$$

$$N = \frac{R}{R + Q} \quad (5)$$

Analizando la fórmula (5) se llega a la conclusión de que el peso del pilote no debe ser muy superior al del martillo ya que en caso contrario el rendimiento del impacto sería muy pequeño. En el caso de que densas pesas pesan iguales, el rendimiento sería del 50%. Delmag recomienda que la mínima relación R/Q sea de 1/3 con lo cual se obtiene un rendimiento del 25%.

## 2.- Determinación de la energía elástica y penetrante del pilote.

La energía introducida en el pilote causa que el pilote y el suelo están comprimidos hasta que la resistencia del suelo está superada y el pilote puede penetrar.

El diagrama siguiente muestra este proceso:

$W_0$  = resistencia del suelo inicial y comienzo de la compresión.

$W$  = Resistencia del suelo máxima a superar.

f = Elasticidad de pilote y suelo por golpe.

s = penetración permanente del pilote por golpe.

La superficie rayada representa la energía útil del martillo Diesel consumiéndose durante la compresión del pilote y suelo y mientras que el pilote penetra, resulta:

energía útil = energía elástica + energía de penetración.

Según el diagrama la superficie del triángulo ABW. corresponde a la energía elástica.

$$E_f = \frac{W \cdot f}{2}$$

La superficie del rectángulo ABCD corresponde a la energía de penetración

$$E_e = \frac{W \cdot f}{2}$$

La superficie del rectángulo ABCD corresponde a la energía de penetración

$$E_e = W \cdot S.$$

Resulta de la suma  $E_f + E_e$  la superficie entera del diagrama y así la consumida energía útil trasladada al pilote durante el proceso de penetración.

$$E_N = E_f + E_e$$

o poniendo la ecuación (5), usando  $W \cdot \frac{f}{2}$  por  $E_f$  y  $W \cdot S.$  por  $E_e$

$$\frac{R^2 \cdot h}{R + Q} = W \cdot \frac{f}{2} + W \cdot S. \quad (6)$$

Como la magnitud  $\frac{f}{2}$  no se conoce antes de comenzar las obras de hinca,  $f/2$  ha sido sustituido por el término  $c \cdot l$  en la fórmula de hinca Delmag. En este caso  $c$  es un valor empírico para la elasticidad del pilote y suelo en mm/metro de la longitud del pilote.

$$\frac{R^2 \cdot h}{R + Q} = W \cdot c \cdot L + W \cdot S.$$

Despejando  $W$  de la ecuación de arriba

$$W = \frac{R^2 \cdot h}{(CL+S) (R+Q)}$$

o, usando  $E$  por  $R \cdot H$ , resulta la fórmula de hinca DELMAG.

$$W = \frac{E \cdot R}{(C \cdot L + S) (R + Q)}$$

que sirve para calcular de antemano la resistencia del suelo y así la carga técnica límite del pilote en base a la penetración permanente por golpe como promedio de los últimos 10 golpes.

Como puede haberse apreciado al derivar la fórmula la capacidad de carga que se obtiene es netamente por punta ya que no tiene en cuenta la fricción lateral entre pilote y suelo. En consecuencia es conservadora, puesto que la capacidad total de un pilote está dada por la suma de sus capaci-

dades por punta y fricción.

Para obtener una cifra conservadora de carga se debe aplicar un coeficiente de seguridad apropiado, generalmente de 2 a 3 ya que no está incluido en la fórmula.

El factor de elasticidad del pilote y suelo (c) empíricamente son 0.6 para pilotes de madera y 0.3 para pilotes de concreto y acero y deben comprobarse con las lecturas de penetración real en los últimos 10 golpes. A continuación se explica el método a utilizar.

3.- Examinación de la Resistencia del Suelo W calculada de antemano durante el proceso de hincar.

La resistencia del suelo antes calculada puede examinarse en la preparación media por golpe después de los últimos 10 golpes durante el hincado midiendo a mano la magnitud de la elasticidad  $f$  y después comparando la mitad de la magnitud de la elasticidad  $f/2$  con la magnitud puesta en la fórmula de hincado C-L

En el caso de que la magnitud  $f/2$  no concuerde con la magnitud de experiencia C.L empleada en la fórmula de hincado, hay que poner en ella la magnitud  $f/2$  en vez de C.L y calcular de nuevo la resistencia del suelo. El siguiente diagrama resulta de la medición a mano:

Poner el lápiz en la plancha y tirarlo lentamente desde la izquierda a la derecha durante el proceso de hincar.

#### 4.- Dimensiones en la Fórmula de hincada DELMAG

La fórmula de hincada DELMAG es:

$$W = \frac{E - R}{(CL + S) (R + Q)}$$

Reemplazando las unidades respectivas se obtiene:

$$W = \frac{\text{kg m} \cdot \text{kg}}{(\text{mm} + \text{mm}) (\text{Kg} + \text{Kg})}$$

$$W = \frac{\text{kg m} \cdot \text{kg}}{10^3 \text{ m} \cdot \text{kg}}$$

$$W = 10^3 \text{ kg}$$

$$W = \text{Toneladas.}$$

#### TIPOS DE MARTILLO

Los cuadros de las figuras 6 y 7 describen las principales características de los martillos DELMAG. Características necesarias para elegir el tipo de martillo, calcular la capacidad de carga de los pilotes y conocer las condiciones de operación durante el hincado.

Se describen los martillos D-30, D-22, D-12 y D-5, que son los usados actualmente en el país (fig. 6). Adicionales a ellos.

DELMAG posee los modelos D-36, D-44 y D-55

Los martillos más potentes, a partir del modelo D-22 inclusive tienen su energía regulable para 10 intensidades (Ver Págs.           ), mientras que en los modelos pequeños D-12 y D-5 la energía es constante.

MOD	DIM	A	B	C	D	E
D-30		4320	Ø390	1710	440	Ø580
D-22						
D-12		4245	Ø300	1750	350	Ø460
D-5		3816	Ø210	1415	270	Ø320

MEDIDAS EN MILIMETROS

CUADRO DE ESPECIFICACIONES

ESPECIFICACION	D-30	D-22	D-12	D-5
Peso del Pistón R , en Kg.	3000	2200	1250	500
Energía/golpe E, en kg - m	3300 Ver Fig 9	2420 Ver Fig 8	3125	1250
Número de golpes por minuto	39-60	42-60	42-60	42-60
Máxima presión so- bre el pilote, kg.	110,000	72,000	42,500	21,000
Consumo de combusti- ble, gals/hora	2.90	2.88	1.77	0.9
Consumo de lubri- cante, gals/hora	0.40	0.33	0.16	0.11
Capacidad tanque combustible, gals.	8.5	8.5	3.5	2.55
Capacidad, tanque lubricante, gals.	1.55	1.50	0.66	0.44
Peso total de ope- ración, kg.	5,600	5,600	2,750	1,240
Inclinación del pi- lote hasta	45°	45°	45°	45°

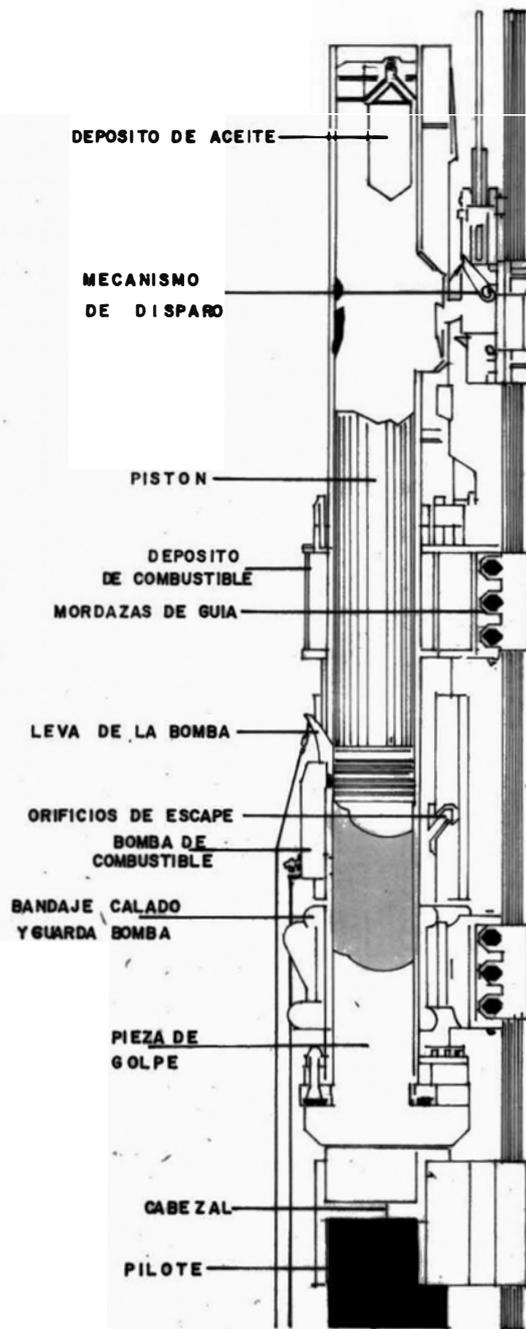
Fig. Nº 7

INFORME SOBRE TRABAJOS DE HINCA

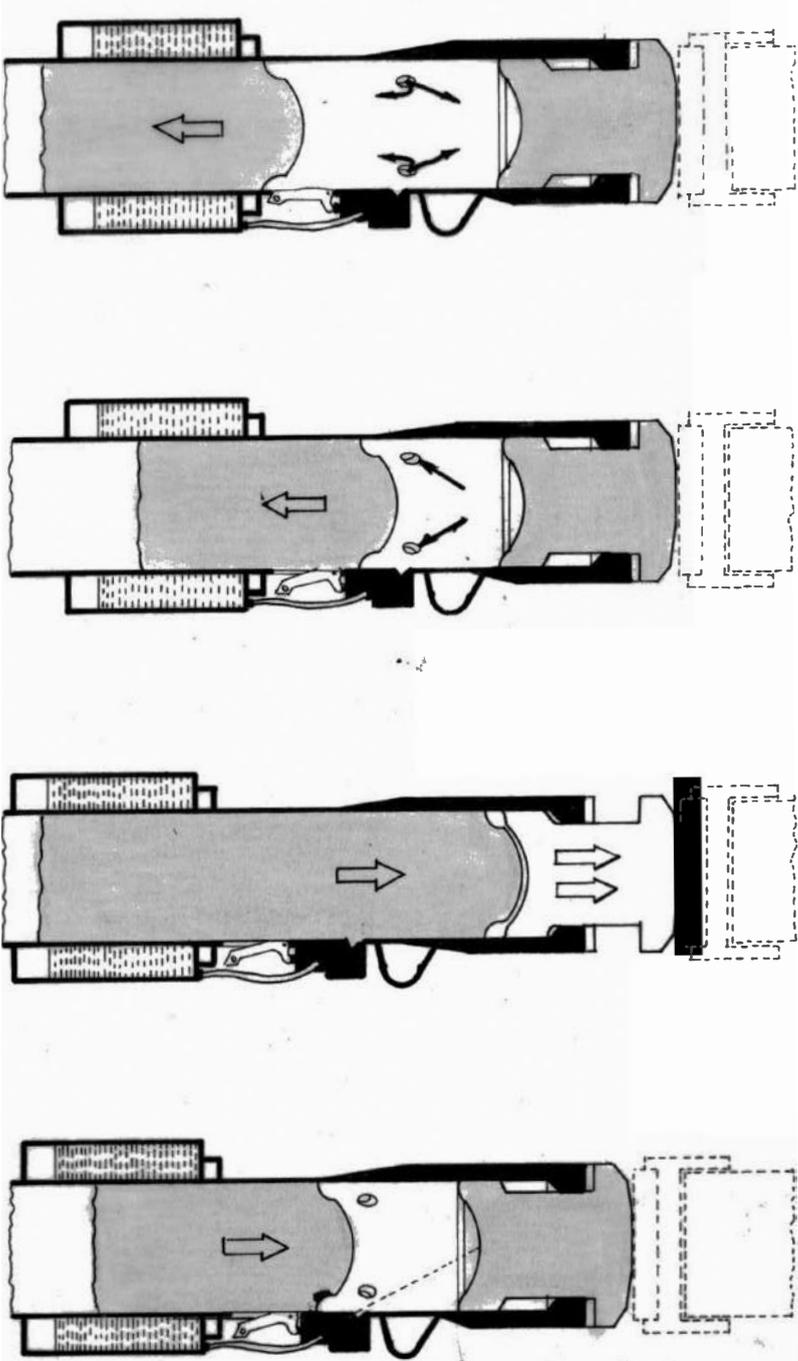
A manera de comparación se presentan los siguientes cuadros sobre trabajos de hincado con los martillos D-30, D-22, D-12 y D-5 para pilotes de madera, concreto y acero en diferentes condiciones de suelo. Han sido tomados de los reportes de DELMAG

MODELO	PILOTE			SUELO	TIEMPO DE HINC POR PILOTE min.
	MATERIAL DIMENSIO NES	LONGITUD m.	PESO Kg.		
D - 30	Concreto 40/40 cm.	20	8000	Arena, Arci- lla, turba	25 - 40 min.
D - 30	Concreto 40/40 cm.	16	6000	Arena	30 - 40
D - 30	Tablesta ca Acero	20	3200	arena con ba rro, arcilla dura	60 - 100
D - 22	Madera Ø 45-60cm	30	7500 8000	arena, grava gruesa	35 - 40
D - 22	Concreto 40/40 cm	18	7000	arena con li mo	28 - 35
D - 22	Concreto 45/45 cm	24.5	12000	arena	45 - 50
D - 22	Acero Ø 47 cm	21	4800	arena fina en grava	30 - 40
D - 12	Madera Ø 50-60cm	10-12	1600	arena, guija- rros con are na	15 - 20
D- 12	Concreto 35/35 cm	11	3250	arena de mar fina	20

MODELO	PILOTE			SUELO	T. DE HINCADO
	M <sub>D</sub>	L	P		
D - 12	Concreto 40/40	12	4600	arena con barro guijarras	30 - 45
D - 12	Acero Ø 37 cm	12.4	2150	guijarras con arena	25 - 30
D - 5	Madera Ø 25 cm	10-15	400- 600	arena fina	30
D - 5	Concreto 30/30 cm	7	1500	barro, arena, marga	20 - 25
D - 5	Concreto 30/30	8.5	1850	humos, arena, guijarro	8 - 12
D - 5	Acero Larssen LP-2	5.5-	540- 705	barro, <u>guija</u> rros, arena	5 - 19



**FIGURA N. 1**



**FIGURA N.º 2**

## CAPITULO VII

### PRUEBAS DE CARGA

#### OBJETO

Una cimentación profunda para ser satisfactoria debe tener una capacidad sustentante máxima; es decir, la resistencia del suelo al cortante debe ser adecuada y que el asentamiento bajo una carga de trabajo debe ser tolerable. Una prueba de carga sobre un pilote o pilotes puede proporcionar información únicamente sobre la capacidad máxima sustentante.

En suelos cohesivos, el asentamiento es una función de la longitud de tiempo en la aplicación de carga. Como el período de duración, en una prueba de carga, es generalmente tan corto relativo al tiempo requerido para aproximarse al

asentamiento completo, la prueba de carga no dice nada respecto al comportamiento de un solo pilote en relación al asentamiento, sin considerar la diferencia en el asentamiento y comportamiento de un grupo de pilotes al compararse con un pilote sencillo.

En suelos no cohesivos, la prueba de carga mostrará el comportamiento al asentamiento de un pilote sencillo, pero dice poco del asentamiento de grupo, aunque este asentamiento será mayor al de un solo pilote.

Básicamente, una prueba de carga de pilote puede determinar únicamente la **maxíma** capacidad sustentante y no las características de asentamiento del grupo. Los cálculos de asentamiento son un tema aparte en el cálculo correspondiente a la mecánica de suelos. Es imposible evaluar las pruebas a no ser que los registros de perforación presenten un panorama completo bajo tierra o cercano al pilote de prueba.

#### Tipos de pruebas de cargas

Dos tipos de pruebas de carga pueden ser ejecutados sobre pilotes: la prueba de velocidad constante de penetración la prueba a carga sostenida. En este último tipo las cargas son aplicadas en incremento y es la más comúnmente utilizada.

En la prueba a velocidad constante de penetración el pilote es cargado de tal manera que se obtenga una velocidad constante de movimiento hacia abajo hasta que se alcanza el punto de falla. La falla se define como la carga a la cual el pilote continúa asentándose sin incrementar la carga, o la carga a la cual el asentamiento alcanza un valor de un décimo (1/10) del diámetro o lado del pilote en la base.

Una velocidad de penetración de 0.03 pulgadas por minuto es adecuada para pilotes de fricción en arcilla, con lo cual se alcanza la falla por lo general, con una penetración total menor a una pulgada.

Se requieren relativamente grandes movimientos, posiblemente, tanto como un décimo de la base del pilote para pilotes de punta y una velocidad de 0.06 pulgadas por minuto es adecuada.

Whitaker ha indicado que no se alteran significativamente los resultados si se adoptan un medio o el doble de las velocidades arriba indicadas.

Este método tiene la ventaja de que es ejecutado en un corto período de tiempo siendo por lo tanto útil para pruebas preliminares cuando las cargas de falla son desconocidas y el diseño está basado en un factor de seguridad contra cargas últimas y se desea conocer el factor de seguridad real.

Sin embargo, tiene la desventaja de que no se puede conocer el asentamiento elástico bajo la carga-trabajo (es decir, el asentamiento total menos el asentamiento permanente), lo cual es de mucha importancia para saber si bajo

la carga de trabajo se ha presentado la fluencia plástica del suelo. También tiene la considerable desventaja de requerir pesadas cargas cuando grandes pilotes son cargados a la falla como lo requiere el método.

Debido a la variación natural en las condiciones del terreno, una prueba realizada y hasta la carga de trabajo es insuficiente. Una prueba sobre un pilote puede justamente satisfacer el criterio de asentamiento pero si se le aplica la misma carga a un pilote adyacente no sometido a prueba puede experimentar asentamientos excesivos. Por lo tanto, una prueba de carga debe realizarse teniendo un factor de seguridad adecuado sobre la carga de trabajo, como 1.5 a 2.0 y limitar el asentamiento permisible bajo la carga de trabajo. Estas pruebas son realizadas con el método de carga sostenida.

Es práctica común, especificar para la carga de trabajo límites para el asentamiento total y residual (asentamiento total menos la recuperación obtenida al remover la carga). Los valores especificados se determinan teniendo en cuenta que todo lo que necesita el Ingeniero Estructural es satisfacerse de que el asentamiento bajo la carga de trabajo no excederá un valor que pueda ser tolerable por la superestructura.

Si se trata de pilotes aislados en pequeños grupos, el asentamiento permisible de la prueba debe ser gobernado sobre consideraciones de asentamiento de la superestructura. Si los pilotes se encuentran dispuestos en grandes grupos o

cercanamente espaciados en pequeños grupos gobernarán las condiciones de asentamiento diferencial.

#### METODOS DE PRUEBAS

Existe un buen número de sistemas desarrollados para lograr pruebas de carga o de extracción de pilotes. Solamente unas cuantas se pueden ilustrar aquí pero estas servirán para indicar la flexibilidad permisible en el diseño y el ingenio que se puede aplicar para lograr las pruebas con gran economía de tiempo y el empleo del equipo disponible.

Las pruebas de carga se pueden aplicar:

- a. Mediante carga directa a partir de una plataforma sobre la cual se colocan pesos considerables (fig. 1)
- b. Mediante carga directa a partir de una plataforma sobre la cual se colocan tanques de agua para ser llenados según se desee;
- c. Mediante el gateo sobre una plataforma cargada (fig. 2)
- d. Mediante el gateo contra pilotes previamente indicados (Fig. 3)
- e. Mediante la aplicación de carga con un brazo en cantilever reduciendo así la magnitud de carga necesaria (fig. 4).

La carga directa puede consistir de lingotes de hierro, tierra, bloques de concreto, tanques de agua, etc. Se han empleado bolsas de cemento, pero para poder utilizar este sistema con éxito se debe estar seguro del clima. El abas

tecimiento de suficiente carga fija, tal como lingotes de hierro, rieles, etc., es ocasionalmente difícil u el otro de tal carga completa para cargados repetidos y liberaciones sobre el mismo pilote, usualmente deseables, es casi impracticable, Los tanques de agua pueden arreglarse para drenar y llenar con facilidad. Existe el peligro de apilar inapropiadamente cargas fijas. Los soportes esquinales deben estar colocados cerca y bajo las plataformas, para recibir la carga de ocurrir volteos debido al traslado de cargas o en caso de ceder el suelo. El gateo contra una carga fija sobre plataforma es preferible al descanso en la carga sobre el pilote. Las plataformas siempre permanecen descansando sobre un entramado, reduciéndose el peligro. El gateo usualmente se realiza con gatas hidráulicas; otra ventaja del gateo consiste en que las cargas pueden ser aplicadas y liberadas rápidamente y a voluntad, permitiendo rápidos cálculos de asentamiento netos en el pilote, o movimientos en el suelo, después de ocurrir el rebote.

#### SISTEMAS PARA EFECTUAR PRUEBAS DE CARGAS VERTICALES

El siguiente sistema descrito es e comunmente . .  
usado con ligeras variantes:

1.- GENERALIDADES

1.1.- Se ensaya el pilote, dándole carga por medio de una gata hidráulica y tomando las reacciones por medio de pilotes de anclaje unidos por una viga suficientemente potente o reaccionando la gata contra plataforma cargada.

1.2.- En caso de que se usara el pilote de anclaje se hinca primero el pilote de prueba.

1.3.- La separación entre pilotes será mínimo de 1.50 m. tratando de evitar superposición de efectos contrarios.

1.4.- Las pruebas se realizarán después del período de adaptación: 2 a 3 días para pilotes en terreno permeable y aproximadamente un mes para pilotes hincados total o parcialmente hincados en limo o en arcilla.

1.5.- Se tomarán registros del clavado del pilote de prueba y de los pilotes de anclaje, para así poder estimar sus capacidades de cargas (compresión y tracción respectivamente).

1.6.- Se usarán mínimo tres (3) extensómetros con una precisión mínima de 0.01 mm cuyos soportes deberán ser fijos y distanciados mínimo 2.40 m. (8 ') del centro de la cabeza del pilote (evitando que los soportes desciendan influenciados por el asentamiento del pilote de prueba).

1.7.- Los extensómetros estarán distribuidos simétricamente en la cabeza del pilote.

1.8.- Para controlar el movimiento de los pilotes de anclaje se colocará un (1) extensómetro en cada uno de estos pilotes.

2.- PROGRAMA (Adaptado de las Normas ASTM)

Día 1º.

- 2.1.- La carga vertical máxima será el doble de la carga de servicio (F.S. = 2).
- 2.2.- Los incrementos de la carga vertical serán de 25% respecto a la carga de diseño.
- 2.3.- Inmediatamente antes y después de cada aplicación de incremento de carga, se efectuarán las lecturas en los instrumentos de medición.
- 2.4.- Los incrementos de carga vertical se efectuarán cada hora salvo que la deformación exceda 0.3 mm/hora, en cuyo caso se esperará a que la deformación se estabilice o transcurran dos (2) horas, el tiempo menor.
- 2.5.- La carga vertical máxima se mantendrá durante 24 horas después de aplicada.

Día 2º.

- 2.6.- Durante el día se efectuarán lecturas a los instrumentos de medición cada cierto período de tiempo prudente y al término de las 24 horas de espera.
- 2.7.- Transcurridas dichas 24 horas de espera, se produ-

de a la descarga vertical con cargas permanentes de: 150, 100, 50, y 20% de la carga de trabajo.

- 2.8.- Entre las descargas transcurrirá media hora efectuándose lecturas inmediatamente antes y después de cada una de las descargas.

Día 3º

La medición final se efectuará después de 24 horas del retiro completo de la carga vertical.

### 3.- INFORMACIONES

- 3.1. Se enviarán las hojas de registro con los resultados de todas las informaciones obtenidas de la prueba de carga:
- a. Descripción de las condiciones del suelo en el lugar de ubicación del pilote de prueba, indicando la profundidad de la napa freática.
  - b. Descripción del pilote, fecha de vaciado, fecha de hincado. Registro continuo de golpes y asentamiento y rechazo final por golpe durante los últimos 7.5 cm. o más de la hinca.
  - c. Descripción del martillo y condiciones de operación durante la hinca.
  - d. Tabulación de las cargas y asentamientos antes y después de cada incremento o decremento de carga en el pilote de prueba.

- e. Representación gráfica de los resultados de la prueba de carga en una curva tiempo-carga-deformación.
- f. Observaciones sobre cualquier hecho anormal ocurrido durante la hinca o carga del pilote de prueba.

#### REGLAS PARA LA DETERMINACION DE CARGAS DE TRABAJO

La máxima capacidad del pilote se define en la mayor parte de la literatura sobre mecánica de suelos, como la carga más alta a la que el pilote comenzará a romper el terreno, o expresado matemáticamente, cuando  $\frac{p}{s}$  aproximase a 0; esto es, cuando la tangente a la curva carga-asentamiento se vuelva horizontal, con el asentamiento trazado en el eje de las abscisas. En la práctica ingenieril de pilotes, sin embargo, es usual la selección de un punto más allá del cual la relación de cambio se incrementa marcadamente o el incremento de asentamiento es excesivo en comparación con el incremento de carga, para denotar esto como falla y luego aplicar un factor de seguridad. Aunque tal método requiere mucha consideración respecto a la magnitud del asentamiento, deberían hacerse cálculos separados de asentamiento bajo el pilote, grupo de zapatas y totalidad de la estructura de acuerdo con la teoría establecida en mecánica de suelos.

Se han empleado muchas reglas arbitrarias o empíricas o están contenidas en reglamentos que sirven como cri-

terios para determinar la carga de trabajo permisible a partir de los resultados en pruebas de carga. Algunas toman en consideración las deformaciones plásticas y elásticas, otras no. En algunas gráficas de prueba, el punto de fatiga ya sea el asentamiento bruto, o asentamiento plástico es tan evidente, que las reglas son necesarias. En otros casos, la curva modifica su pendiente tan gradualmente que la determinación del punto de ruptura es difícil y la aplicación de una o todas estas reglas, que representan el juicio y experiencia de muchos ingenieros, puede ser de gran ayuda.

He aquí, unas cuantas de estas reglas.

1. "BOSTON BUILDING CODE". La carga de prueba será el doble de la carga de diseño y deberá mantenerse constante por lo menos 24 horas, hasta que el asentamiento o rebote no exceda 5.5 mm. en 24 horas. La carga de diseño no excederá un medio de la máxima carga aplicada, siempre y cuando la curva de carga-asentamiento, no muestre señales de ruptura y el asentamiento permanente de la cabeza del pilote, después de la prueba, no exceda los 12.5 mm.

2. "DEPARTMENT OF PUBLIC WORKS State of California". Obsérvese el punto en el cual no ha ocurrido asentamientos durante 24 horas; el asentamiento total correspondiente no deberá ser mayor a 0.025 cm/ton, de carga de prueba y divídase por un factor de seguridad de 2.

3.- "AASHO" - La carga segura permisible será considerada un 50% de la carga que, después de una continua aplicación de 48 horas, produce asentamientos permanentes, no mayores que 6.3 mm. medidas en el tope del pilote. Este asentamiento máximo no se incrementará por la aplicación continua de la carga de prueba durante un período que puede ser de 60 horas o más.

4.- "BUREAU OF BRIDGES, State of Ohio" Obsérvese el punto en el cual el asentamiento bruto comienza a exceder los 0.075 cm/ton. de carga adicional y divídase por un factor de seguridad de 2 para cargas estáticas o 3 para cargas vibratorias.

5.- "LEYES CONSTRUCTIVAS DE LA CIUDAD DE NUEVA YORK" Las pruebas serán llevadas a cabo con un 2001 de la carga propuesta y consideradas satisfactorias si, después de 24 horas, el asentamiento total neto después del rebote es más de 0.025 cm/ton de carga total.

6.- Obsérvese el punto en que se quiebra burscamente la curva plástica y divídase por un factor de seguridad de 1.5.

7.- Dibújense líneas tangentes a las pendientes generales de las porciones superiores e inferiores de las curvas, obsérvese la carga en sus intersecciones y divídase por un factor de seguridad de 1.5 a 2.

8.- Obsérvese el punto en el cual la pendiente de la curva de asentamiento bruto es cuatro veces la pendiente de la gráfica de deformación elástica del pilote y divídase entre un factor de seguridad adecuado.

9.- "INTERNATIONAL CONFERENCE OF BUILDING OFFICIALS Uniform Building Code" La carga axial aislada permisible sobre un pilote solitario no deberá exceder:

- a. un 50% del punto límite bajo la prueba de carga. Este será definido como un punto en el cual un incremento de carga produce un aumento desproporcionado en asentamiento o
- b. Un medio de la carga que causa un asentamiento neto, después de producirse el rebote, de 0.025 cm/ton de prueba de carga que ha sido aplicada por un período mínimo de 24 horas, o
- c. Un medio de la carga bajo la cual, durante un período de 40 horas de continua aplicación de carga, no ocurren asentamientos adicionales.

10.- "UNITED STATES STEEL CO." Tómense dos tercios de la máxima carga de prueba en un caso donde el asentamiento no es excesivo y donde la carga y asentamiento sea proporcional y la curva permanezca una línea recta. Cuando la carga de prueba sea llevada a la fatiga, tómense dos tercios de la mayor carga con la cual el asentamiento no fuera excesivo y en la que las cargas ya sentamientos fueran proporcionales.

11.- "BETHLEHEM STEEL CO." - Con varias confiables sobre el área de la estructura, tómesese de un medio a dos tercios de la carga de ruptura, considerada en la proximidad del quiebre de curva donde experimente un asentamiento incrementado por unidad de carga añadida.

12.- "NEW YORK STATE, Department of Public Works". La carga segura admisible será considerada como un 50% de la carga que, después de 48 horas de aplicación, causa un asentamiento permanente de no más de 6.3mm.

13.- "CHICAGO BUILDING CODE" - Un medio de la carga de prueba será admitido como carga sustentante, si después de 48 horas de aplicada la carga máxima el asentamiento total no excede de 0.025 cm/ton de carga de prueba.

14.- "LOS ANGELES BUILDING CODE" - Obsérvese la carga con la que se produce un incremento en el asentamiento, desproporcionado al aumento en la carga y aplíquese un factor de seguridad de 2.

15.- "LOUISIANA DEPARTMENT OF HIGHWAYS" - Obsérvese la carga sustentada sin exceder un asentamiento total permanente de 6.3 mm en 48 horas y divídase entre un factor de seguridad de 2.

16.- "RAYMOND CONCRETE PILE COMPANY" - Obsérvese el punto en el cual el asentamiento bruto comienza a exceder los 0.125 cm/ton de carga adicional, o en el cual el asenta-

- miento plástico comienza a exceder los 0.0075 cm/ton de carga adicional y divídase entre un factor de seguridad de 2 para cargas estáticas o 3 para cargas vibratorias.

17.- "TERZAGHI & PECK" - Cuando la capacidad de carga de falla no tiene valor definido, la curva carga-deformación se aproxima lentamente a la horizontal, la carga admisible no debe exceder de un medio de la carga necesaria para producir un asentamiento del pilote igual a 5 cm.

## C O N C L U S I O N E S

La Cimentación profunda mediante el uso de pilotes ofrece una solución adecuada para la fundación de edificaciones que reposan en suelos pésimos o que no reúnen las condiciones adecuadas de seguridad para el proyecto.

- El pilote es un elemento estructural que transmite las cargas de las edificaciones a estratos profundos del terreno, los cuales reúnen las condiciones para una cimentación adecuada.

- La determinación de la capacidad portante de pilotes individuales por los métodos dinámicos son métodos prácticos y primordialmente empíricos, basados en el criterio de energía desarrollada por el peso de un martillo que cae desde cierta altura.

- Estas fórmulas basadas en la teoría del impacto dinámico expresan la resistencia ofrecida por el terreno al hincado y no tienen relación con la capacidad del terreno por debajo de las puntas del pilote.

- Las fórmulas dinámicas permiten encontrar valores de capacidad portante cercanos a las que se presente en condiciones estáticas para suelos no cohesivos. En el caso de hincado de pilotes en material plástico las relaciones entre la resistencia temporal al hincado y la resistencia per-

manente a la carga aplicada sobre el pilote son inseguras.

En general las fórmulas de hincado dan buena aproximación de la capacidad portante del pilote si se usa un buen criterio para la elección de la fórmula adecuada y se hace una interpretación correcta de los resultados. El resultado es tanto más exacto cuando mayor es el peso del mazo con relación al peso del pilote.

- El cálculo estático de la capacidad portante es necesario para estimar el número y longitud de pilotes requeridos para una sub-estructura.

- Básicamente las fórmulas estáticas consideran dos tipos de resistencia: la resistencia por punta y la resistencia por la fricción desarrollada en las paredes del pilote.

- Las pruebas de carga para determinar la capacidad portante son sumamente útiles; sin embargo, antes de tomar los resultados como valores de plena confianza y sacar conclusiones, deben examinarse con mucho detenimiento.

Debe considerarse que las pruebas de carga se realizan sobre pilotes individuales y no expresan el comportamiento de toda la estructura. Esto exige obrar con mucho criterio para elegir el factor de seguridad.

- Cuando más se aproxima la forma de funcionar de un pilote al del trabajo por punta, más confianza merecen los resultados de las pruebas,

- Es preferible realizar las pruebas de plantear el proyecto de la estructura.

- Los pilotes estructuralmente deben ser diseñados para soportar los esfuerzos generados por la carga a ser soportada, el izaje y clavado.

- La longitud de pilotes se estima considerando los datos del estudio de suelos y mediante las pruebas de hinca.

- Los pilotes se fabrican generalmente de secciones cuadradas y octogonales por la facilidad de encofrado y de dimensiones determinadas que consideran las dimensiones de los tableros de encofrado.