

# **CIMENTACIONES PROFUNDAS**

**Jorge E. Alva Hurtado, PhD  
CISMID-FIC-UNI**

## **1.0 INTRODUCCION**

- 1.1 Generalidades
- 1.2 Funciones y Usos de los Pilotes
- 1.3 Alcance

## **2.0 CAPACIDAD DE CARGA DE PILOTES Y GRUPOS DE PILOTES**

- 2.1 Capacidad de Carga Ultima de un Pilote en Suelo Cohesivo
- 2.2 Capacidad de Carga Ultima de un Pilote en Suelo Granular
- 2.3 Capacidad de Carga Admisible de un Pilote
- 2.4 Fricción Negativa
- 2.5 Capacidad de Carga de Grupos de Pilotes
  - 2.5.1 Eficiencia de Grupo
  - 2.5.2 Suelos Granulares
  - 2.5.3 Suelos Cohesivos
  - 2.5.4 Pilotes de Punta Hincados al Rechazo
  - 2.5.5 Suelos que Contienen Estratos Blandos
  - 2.5.6 Longitudes de Pilotes Cercanos

## **3.0 ASENTAMIENTO DE PILOTES Y GRUPOS DE PILOTES**

- 3.1 Asentamiento de un Pilote Individual en Arcilla
- 3.2 Asentamiento de Pilotes dentro de un Grupo en Arcilla
- 3.3 Asentamiento de un Pilote Individual en Arena o Grava
- 3.4 Asentamiento de un Grupo de Pilotes en Arena o Grava
- 3.5 Un Método Simple para Estimar el Asentamiento de un Grupo de Pilotes
- 3.6 Compresión del Pilote.

## **4.0 FORMULAS DE HINCA**

## **5.0 ENSAYO DE CARGA EN PILOTES**

- 5.1 Generalidades
- 5.2 Formas y Tipos de Aplicación de Carga
- 5.3 Procedimiento de Carga
- 5.4 Criterios de Carga de Falla

## **REFERENCIAS**

**ANEXO PROGRAMA DE COMPUTO PARA EL CALCULO DE LA CAPACIDAD ULTIMA DE PILOTES  
BAJO CARGA AXIAL**

# **COMITE PERUANO DE MECANICA DE SUELOS, FUNDACIONES Y MECANICA DE ROCAS**

## **SEMINARIO “CIMENTACIONES DE ESTRUCTURAS”**

### **CIMENTACIONES PROFUNDAS**

**Jorge E. Alva Hurtado, PhD  
CISMID - FIC,  
Universidad Nacional de Ingeniería**

#### **1.0 INTRODUCCION**

##### **1.1 Generalidades**

El uso de pilotes es una de las técnicas más antiguas del hombre para superar las dificultades de la cimentación de estructuras en suelos blandos. Antes del siglo XIX, el tipo de cimentación más común en los edificios eran zapatas continuas, y sólo si el terreno era incapaz de soportar las presiones que ejercían las zapatas, se usaban pilotes. El diseño de estas cimentaciones estaba basado en la experiencia o simplemente dejado a la divina providencia.

En sus inicios, los pilotes eran todos de madera por su abundancia y su fácil maniobrabilidad, así que para dar seguridad a una estructura se hincaban pilotes en forma abundante, sin ninguna norma y a criterio del constructor. De esta manera, la capacidad de carga del pilote estaba limitada por el grosor de la madera y su capacidad de soportar el peso del martillo sin astillarse. Es así que en un principio se crearon reglas primitivas mediante las cuales la carga admisible de un pilote se basaba en la resistencia al golpe de un martillo de peso y altura de caída conocidos. Como el tipo de estructura de esa época no sufría grandes asentamientos, no surgió otro material que lo reemplace.

A medida que el desarrollo industrial aumenta, se crea una demanda de estructuras pesadas en lugares de terreno blando; surge entonces el pilote de concreto como una solución que supera largamente al pilote de madera, debido a que podía ser fabricado en unidades de las mismas dimensiones que el pilote hecho de madera, pero capaz de soportar compresiones y tensiones mucho mayores. Además que puede moldearse en cualquier forma estructural de acuerdo a las solicitaciones de carga y del tipo de suelo sobre el que se hinca. Con el desarrollo de las máquinas de gran eficiencia de perforación a gran profundidad y diámetro, se reemplazó parcialmente los pilotes hincados por los pilotes moldeados in-situ.

Posteriormente el acero, por su fácil maniobrabilidad y gran resistencia de hincado a grandes profundidades, empezó a tener auge, siendo los problemas de corrosión solucionados con la introducción de capas de pinturas durables y resistentes.

Conforme el costo de las cimentaciones piloteadas toma importancia, surge la necesidad de determinar un número de pilotes que no fuese mayor que el necesario para proporcionar seguridad a la estructura; se llega entonces a especulaciones teóricas que dan por resultado fórmulas de hinca, aunque posteriormente se determina que éstas adolecían de grandes defectos, haciéndose usual determinar la carga admisible del pilote ejecutando ensayos de carga sobre un pilote de prueba y determinando el número de pilotes mediante el cociente de la división de la carga total entre la carga admisible por pilote. Algunas estructuras resultaron satisfactorias, sin embargo, otras fallaron, de lo cual se deduce que el asentamiento de una cimentación no está necesariamente relacionado con el asentamiento de un pilote de prueba, aún cuando la carga por pilote fuese igual a la carga del pilote de prueba. De cualquier forma,

es necesario conocer la capacidad de carga de un pilote porque forma parte de la información para desarrollar un proyecto de cimentaciones piloteadas.

Para tener una cabal comprensión del comportamiento de pilotes, se debe conocer todos los tipos de pilotes y los métodos de instalación existentes. El diseño y la construcción de cimentaciones piloteadas es un campo de la mecánica de suelos en la que se requiere el criterio de un ingeniero que no se confíe en el discutible valor de una fórmula y que sepa hacer uso de su experiencia, sentido común e intuición del comportamiento de los materiales.

## 1.2 Funciones y Usos de los Pilotes

El pilote es un elemento estructural que forma parte de la infraestructura de la edificación, cuyas funciones principales son las siguientes:

- a) Transferir cargas de la superestructura y del resto de la infraestructura a través de estratos débiles o compresibles, a través del agua o aire, hasta estratos inferiores con la suficiente capacidad de carga como para soportar la estructura, comportándose el pilote como una extensión de columna o pilar. Estos estratos inferiores pueden ser rocas, arcillas duras o suelos de baja compresibilidad. Al pilote que reposa sobre estos estratos se le denomina "pilote de punta" (Fig. 1.1a).
- b) Transferir o repartir la carga sobre un suelo relativamente suelto a través de la fricción de superficie entre el pilote y el suelo. Este tipo de pilote se le denomina "pilote de fricción" y a su vez se puede subdividir, según Terzaghi, en pilotes de fricción en suelos de grano grueso muy permeable y pilote de fricción en suelos de grano fino o de baja permeabilidad. En la naturaleza es difícil encontrar estratos de suelos homogéneos, por lo que no existe un límite real entre estas categorías (Fig. 1.1b).
- c) En situaciones donde el suelo alrededor de un pilote lo mueve hacia abajo, a esto se le denomina "fricción negativa", esta fricción tiende a hundir el pilote y si éste no puede penetrar más, en la punta del pilote se generará una presión concentrada. Este caso se puede presentar cuando se hinca un pilote en un estrato blando en cuya superficie se coloca un relleno que consolide el terreno, entonces éste al consolidarse generará en las caras del pilote unas fuerzas de fricción hacia abajo que se denominan fricción negativa (Fig. 1.1c).
- d) Proporcionar anclaje a estructuras sujetas a subpresiones, momentos de volteo o cualquier efecto que trate de levantar la estructura. Las fuerzas horizontales se resisten por pilotes en flexión (Fig. 1.1d) o por grupos de pilotes verticales e inclinados que actúan como un sistema estructural, combinando las resistencias axiales y laterales de todo el grupo (Fig. 1.1e).
- e) Alcanzar con la cimentación profundidades que no estén sujetas a erosión, socavaciones u otros efectos (Fig. 1.1f).
- f) Para evitar los daños que puede producir una futura excavación a la cimentación de una edificación adyacente; en este caso el pilote lleva la carga de la cimentación debajo del nivel de excavación esperado (Fig. 1.1g).
- g) En áreas de suelos expansivos o colapsables, para asegurar que los movimientos estacionales no sucederán (Fig. 1.1h).
- h) Proteger estructuras marinas como muelles, atracaderos, contra impactos de barcos u objetos flotantes.
- i) Soportar muros de contención, contrafuertes o cimentaciones de máquinas.
- j) Compactar el suelo.

### 1.3 Alcance

La materia de cimentaciones profundas y el diseño de cimentaciones mediante pilotaje cubre un amplio alcance, sobre el que existen muchas referencias bibliográficas, tales como las que se presentan en las referencias. El propósito de estas notas es introducir los principales tipos de pilotes existentes en nuestro medio y presentar la evaluación de la capacidad portante y asentamiento de pilotes bajo carga axial. Se presenta la evaluación de la capacidad de carga y el asentamiento de pilotes individuales y en grupo, así como las fórmulas de hinca y los ensayos de carga.

En el Anexo se describe un programa de cómputo que permite determinar la capacidad de carga axial de un pilote en base a fórmulas empíricas que utilizan resultados de ensayos de penetración estándar. Se discuten algunos ejemplos de aplicación de dichas fórmulas en la experiencia del autor.

## 2.0 CAPACIDAD DE CARGA DE PILOTES Y GRUPO DE PILOTES

El primer paso en el diseño de pilotes es calcular la capacidad de carga última de pilotes individuales. Existen diversos procedimientos de diseño, los más sencillos serán presentados en este acápite. Después de calculada la capacidad de carga última, deberá determinarse la capacidad de carga admisible del pilote. Algunos comentarios sobre dicha determinación serán indicados.

En ciertas condiciones del terreno, el suelo que rodea la parte superior del pilote se puede asentar con relación al pilote, cambiando la dirección de las fuerzas de fricción en el lado del pilote y tendiendo a jalarlo hacia abajo. Este fenómeno, conocido como fricción negativa, produce una carga adicional en el pilote, de modo que reduce su capacidad portante. Se presentarán los casos donde puede ocurrir fricción negativa y un método para estimar la máxima fuerza impuesta por la fricción negativa.

La capacidad portante de un grupo de pilotes puede no ser igual a la suma de las capacidades portantes de todos los pilotes en el grupo, por lo que debe considerarse el comportamiento del grupo como un todo.

### 2.1 Capacidad de Carga Última de un Pilote en Suelo Cohesivo

La capacidad de carga última de un pilote está compuesta por la resistencia a la fricción y la resistencia en la punta. En arcillas la resistencia por fricción es mucho mayor que la resistencia por punta. Luego:

$$Q_u = Q_s + Q_b$$

La resistencia por fricción lateral en un pilote está dada por:

$$Q_s = \alpha \cdot \bar{c} A_s$$

Donde:

$A_s$	=	superficial lateral empotrada del pilote.
$\bar{c}$	=	resistencia cortante no-drenada promedio de la arcilla a lo largo de los lados del pilote.
$\alpha$	=	factor de adhesión.

Se ha encontrado que el valor de  $\alpha$  puede variar significativamente, por lo que es difícil asignarle un valor. Para pilotes hincados se emplean los valores propuestos por Nordlund (1963) y para pilotes excavados se utilizan los valores de Tomlinson (1975).

La resistencia por punta se obtiene de la ecuación de Meyerhof (1953) para la capacidad portante de suelos cohesivos.

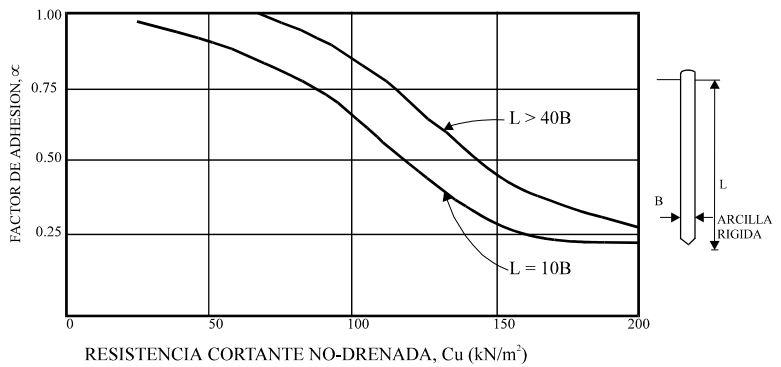
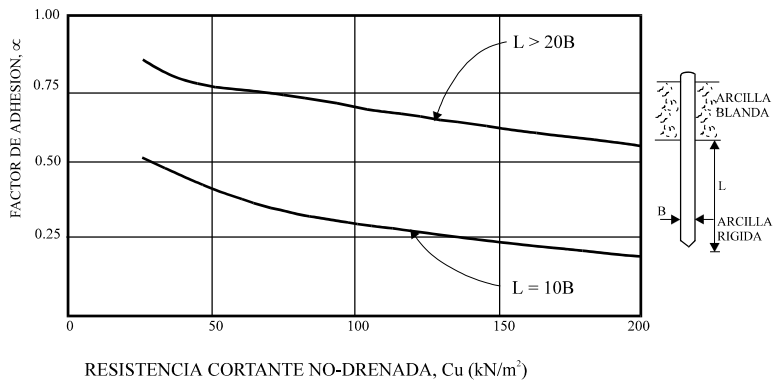
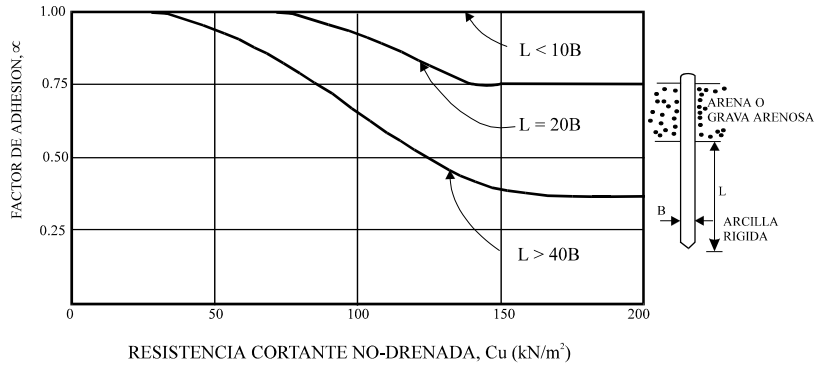
$$Q_b = cN_c A_b$$

**FACTORES DE ADHESION PARA PILOTES EXCAVADOS (TOMLINSON).**

Se usa un factor de adhesión  $\alpha$  de 0.45 para pilotes excavados en muchas arcillas; aunque para pilotes cortos en arcilla muy fisurada, un valor de 0.3 es más usual. Se han reportado valores de 0.49 a 0.52 para arcilla de California. Para arcilla dura  $\alpha$  puede ser tan bajo como 0.1.

Tomlinson recomienda utilizar un valor de 0.45 si no se tiene experiencia previa con la arcilla, hasta un valor máximo de 100  $\text{KN/m}^2$ . Esto puede ser conservador para arcillas blandas y optimista para arcillas muy rígidas y fisuradas.

**FACTOR DE ADHESION PARA PILOTES HINCADOS (NORDLUND)**



Donde:

- $c$  = resistencia cortante inalterada en la base del pilote.  
 $A_b$  = área de la base del pilote.  
 $N_c$  = factor de capacidad de carga de Meyerhof, generalmente se toma 9.

## 2.2 Capacidad de Carga Última de un Pilote en Suelo Granular

La capacidad de carga última de un pilote está compuesta por la resistencia a la fricción y la resistencia por punta. En suelos granulares la resistencia por punta es generalmente mayor que la resistencia por fricción lateral, luego:

$$Q_u = Q_s + Q_b$$

La fricción lateral  $f$  a la profundidad  $z$  está dada por:

$$f = K_s p_d \operatorname{tg} \delta$$

Donde:

- $K_s$  = coeficiente lateral de tierra, la relación de la presión lateral a vertical en los lados del pilote.  
 $p_d$  = esfuerzo efectivo vertical a la profundidad  $z$ .  
 $\delta$  = ángulo de fricción entre el pilote y el suelo.

Para un pilote rodeado por suelo granular entre las profundidades  $z_1$  y  $z_2$ , la resistencia por fricción lateral es

$$Q_s = \frac{1}{2} K_s \gamma (z_1 + z_2) \operatorname{tg} \delta A_s$$

donde  $A_s$  es el área empotrada de  $z_1$  a  $z_2$ . Si el pilote está parcialmente sumergido, las contribuciones por encima y por debajo del nivel freático deben calcularse separadamente.

Los valores de  $K_s$  y  $\delta$  presentados por Broms (1966) se presentan en la Tabla 2.1. Estos valores son válidos hasta un valor de fricción lateral  $f$  de  $110 \text{ KN/m}^2$ , que es el valor máximo que puede ser usado para pilotes de sección constante.

En el cálculo de la resistencia por punta, el tercer término de la ecuación de Meyerhof (relacionado a la fricción en la base) es relativamente pequeño para pilotes largos y esbeltos, por lo que usualmente se ignora. Luego, la resistencia en la base es:

$$Q_b = p_b (N_q - 1) A_b$$

Donde

- $p_b$  = esfuerzo efectivo de sobrecarga en la base del pilote.  
 $A_b$  = área de la base del pilote.

Los valores de  $\phi$  se obtienen de los resultados del ensayo de penetración estándar (sin aplicar correcciones por profundidad, nivel freático o contenido de limo).

Los valores de  $N_q$  de Meyerhof tienden a ser extremadamente altos para cimentaciones por pilotes, cuando se comparan con fallas reales, por lo que los valores obtenidos por Berezantsev (1961) y presentados en la Figura 2.1, son más adecuados. El valor máximo de resistencia por punta a ser usado es de  $1,100 \text{ KN/m}^2$ .

Cuando se calcula la resistencia por fricción y por punta en pilotes excavados en suelo granular, deberá asumirse siempre una densidad relativa baja, independientemente del estado inicial del suelo.

**Tabla 2.1 Valores de  $K_s$  y  $\delta$  para pilotes hincados**

Material del Pilote	$\delta$	$K_s$	
		Densidad relativa baja ( $\phi \leq 35^\circ$ )	Densidad relativa alta ( $\phi > 35^\circ$ )
Acero	$20^\circ$	0.5	1.0
Concreto	$3/4\phi$	1.0	2.0
Madera	$2/3\phi$	1.5	4.0

### 2.3 Capacidad de Carga Admisible de un Pilote

La capacidad admisible se obtiene dividiendo la carga última por un factor de seguridad. Los factores de seguridad se pueden aplicar a la capacidad de carga última o a las capacidades de carga por fricción y por punta separadamente. La capacidad de carga admisible se toma como la menor de:

$$y \quad \frac{Q_s + Q_b}{2.5}$$

$$\frac{Q_s}{1.5} + \frac{Q_b}{3.0}$$

donde  $Q_s$  y  $Q_b$  son las cargas últimas por fricción y por punta respectivamente. El valor de  $Q_s$  en la primera ecuación se basa en factores que utilizan valores promedio de resistencia cortante, mientras que en la segunda ecuación se emplean valores en el rango bajo de la resistencia cortante.

Las fórmulas de capacidad de carga de pilotes solo presentan un rango aproximado de la capacidad de carga última. Excepto cuando se hincan pilotes hasta el rechazo, es usual realizar por lo menos un ensayo de carga en cada sitio. Se pueden hincar pilotes de prueba y ensayarlos hasta la falla. En base a los resultados alcanzados, el ingeniero puede decidir la modificación de las longitudes requeridas.

Es preferible demorar el ensayo de los pilotes tanto cuanto sea posible después del hincado, para permitir el asentamiento del pilote. Esto no es importante en pilotes en suelo granular, donde no son significativos los efectos del tiempo, pero en limos y arenas limosas la capacidad de carga última de un pilote puede ser mucho más alta inmediatamente después del hincado, que una vez que ha transcurrido un período de tiempo. En arcillas lo contrario es usualmente (pero no siempre) cierto; la capacidad portante aumenta con el tiempo, particularmente en arcillas blandas o sensibles.

Para un grupo de pilotes debe verificarse la capacidad portante del grupo como un todo.

### 2.4 Fricción Negativa

La fricción negativa puede ocurrir en los siguientes casos:

- a) Un pilote hincado a través de una arcilla blanda sensible llega a un estrato relativamente incompresible. El remoldeo de la arcilla durante el hincado puede ser suficiente para causar asentamiento. Las arcillas blandas marinas o de estuario pueden ser particularmente susceptibles a desarrollar fricción negativa.

- b) Un pilote hincado a través de una arcilla blanda llega a un estrato relativamente incompresible con sobrecarga en la superficie. Normalmente una arcilla blanda que suprayace a una arcilla dura no tiene problemas. Sin embargo, la carga en la superficie producirá asentamiento que puede generar fricción negativa en el pilote. El drenaje de áreas pantanosas puede tener un efecto similar.
- c) Un pilote hincado a través de relleno recientemente colocado llega a un estrato compresible o relativamente incompresible. La fricción negativa resultará de la consolidación del relleno. En rellenos antiguos la fricción negativa disminuye o no existe.

Actualmente es imposible predecir con precisión la fricción negativa que se producirá en un pilote. Sin embargo, la máxima fuerza que se desarrollará por fricción negativa puede evaluarse si se asume la distribución de esfuerzos de fricción propuesta por Tomlinson (1987). Aunque dicho autor diferencia los casos entre estrato compresible e incompresible en la base, el mismo procedimiento puede emplearse en todos los casos con suficiente precisión.

La máxima carga hacia abajo producida por fricción negativa que se permite para propósitos de diseño puede calcularse asumiendo la distribución de esfuerzos mostrada en la Figura 2.2.

La fricción (o adhesión) en los puntos A y B, que corresponden a las resistencias cortantes pico y residual del suelo respectivamente, serán:

$$f_A = \alpha c_p \quad \text{y} \quad f_B = \alpha c_r$$

donde  $c_p$  y  $c_r$  son las resistencias cortantes pico y residual y  $\alpha$  es un factor de adhesión, generalmente tomado como 1.

Luego la fuerza hacia abajo en el pilote causada por fricción negativa será:

$$\begin{aligned} & \left[ \left( 0.1 H \times \frac{1}{2} \alpha c_p \right) + \left( 0.1 H \times \frac{1}{2} \alpha c_r \right) + \left( 0.8 H \times \frac{1}{2} \alpha (c_p + c_r) \right) \right] S \\ & = 0.45 H \alpha (c_p + c_r) S \end{aligned}$$

donde S es la circunferencia del pilote.

Cuando se calcula la longitud requerida del pilote, la fricción negativa debe añadirse a la carga permisible.

Los efectos de la fricción negativa pueden reducirse o eliminarse si se protege la sección del pilote dentro del relleno o de la arcilla blanda. Como alternativa se puede cubrir el pilote con una membrana plástica de baja fricción o con una capa de bitúmen. Si se emplea bitúmen debe tenerse mucho cuidado en su aplicación para asegurar que éste se adhiere bien al pilote y tiene un espesor mínimo de 3 milímetros.

## 2.5 Capacidad de Carga de Grupos de Pilotes

### 2.5.1 Eficiencia de Grupo

Este valor está definido por:

$$E_f = \frac{\text{carga promedio en pilote en grupo en la falla}}{\text{carga de falla en pilote individual}}$$



## 2.5.2 Suelos Granulares

Los pilotes hincados compactan al suelo granular, aumentando su capacidad portante. Ensayos en modelos han demostrado que los factores de eficiencia de grupo de pilotes hincados en arena pueden llegar hasta 2. En pilotes excavados, la acción de excavación más bien reduce que aumenta la compactación, por lo que el factor de eficiencia de grupo es difícil que sea mayor que 1.

En diseño se usa un factor de eficiencia de grupo de 1 para todo tipo de pilotes en suelo granular. Esto significa que se ignoran los efectos de grupo al predecir la capacidad portante. Sin embargo, los pilotes excavados deben tener un espaciamiento mayor que 3 diámetros (centro a centro).

## 2.5.3 Suelos Cohesivos

En suelos cohesivos se considera al grupo (pilotes y suelo contenido) como una cimentación profunda; la carga última del grupo se puede evaluar con la ecuación de Meyerhof. Por ejemplo, para un ancho de grupo  $B_1$ , longitud  $B_2$ , profundidad  $D$ , la carga de falla es:

$$Q_u = B_1 B_2 \bar{c} N_c \lambda$$

Donde:

- $N_c$  = factor de capacidad de carga de Meyerhof.  
 $\lambda$  = factor de forma.  
 $\bar{c}$  = cohesión promedio de la arcilla que rodea al grupo.

La Figura 2.3 presenta los resultados de ensayo en modelos de Whitaker (1957) para grupos de 3 x 3 y 9 x 9. Se puede utilizar como un método alternativo para estimar eficiencias de grupo. Por lo tanto, la carga de falla del grupo es:

$$Q_u = n Q_u E_f$$

donde  $n$  es el número de pilotes en el grupo y  $Q_u$  es la carga de falla de un pilote individual.

## 2.5.4 Pilotes de Punta Hincados al Rechazo

Debido a que la carga última está limitada por la resistencia del pilote y no por la capacidad portante del terreno, no existe efecto de grupo.

## 2.5.5 Suelos que Contienen Estratos Blandos

Cuando existen capas de arcilla blanda por debajo de los grupos de pilotes puede ocurrir un sobre-esfuerzo, por lo que es necesario realizar una verificación. Se asume que la carga del grupo de pilotes se repartirá como se indica.

- a) Pilotes de fricción en arcilla  
Se asume que la carga se distribuye como se muestra en la Figura 2.4, de los dos tercios del empotramiento del pilote en el estrato resistente.
- b) Pilotes de punta en arena o grava  
Se asume que la carga se distribuye como se muestra en la Figura 2.5, a partir de la base de los pilotes.

En cada uno de los casos indicados, para un grupo de pilotes de dimensiones en planta  $B \times L$ , que soporta una carga  $Q$ , el área esforzada del material blando será:

$$\begin{aligned} & ( B + 2 H \operatorname{tg}30^\circ ) ( L + 2 H \operatorname{tg}30^\circ ) \\ & = ( B + 1.15 H ) ( L + 1.15 H ) \end{aligned}$$

Luego, el esfuerzo en la parte superior del estrato blando será:

$$\frac{Q}{(B + 1.15 H)(L + 1.15 H)}$$

### 2.5.6 Longitudes de Pilotes Cercanos

En tanto sea posible, todos los pilotes de un grupo deben tener aproximadamente la misma longitud.

Cuando se tengan pilotes de diferente longitud, cercanos, es usual diseñar al pilote más corto lo suficientemente largo, de modo que una línea inclinada a 45° de su base no intersecte al pilote vecino más largo. Esto es para evitar que la carga de la punta del pilote corto sea transmitida al pilote largo.

## 3.0 ASENTAMIENTO DE PILOTES Y GRUPO DE PILOTES

El asentamiento de un pilote individual bajo carga de trabajo es usualmente tan pequeño que no presenta problemas. Sin embargo, el efecto combinado de un grupo de pilotes puede producir un asentamiento apreciable, debiendo ser considerado. El estado del conocimiento actual no permite una predicción precisa del asentamiento, sin embargo existen métodos que permiten realizar estimados razonables del asentamiento de pilotes y grupos de pilotes.

Los procedimientos presentados a continuación permiten realizar una estimación aproximada del asentamiento de un grupo de pilotes o de un pilote individual dentro del grupo. La interacción entre los pilotes y el suelo circundante es compleja y no está apropiadamente entendida; en consecuencia, los valores obtenidos por los métodos simples presentados a continuación no producen valores exactos.

### 3.1 Asentamiento de un Pilote Individual en Arcilla

El asentamiento de un pilote en una capa de espesor finito que suprayace a un material incompresible puede obtenerse de la expresión.

$$\rho = \frac{Q}{L E_s} I_p$$

Donde

- Q = carga en el pilote.  
L = longitud del pilote.  
E<sub>s</sub> = módulo de Young del suelo para asentamiento a largo plazo.

$$E_s = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{m_\nu(1 - \nu)}$$

m<sub>ν</sub> es el valor promedio de la capa y ν es la relación de Poisson: 0.4 arcilla SC, arcilla NC rígida y 0.2 arcilla NC blanda a firme.

- I<sub>p</sub> = factor de influencia, obtenido de las Figuras. 3.1 y 3.2.

Debe tenerse cuidado en utilizar sistemas de unidades consistentes.

### 3.2 Asentamiento de Pilotes dentro de un Grupo en Arcilla

El asentamiento ρ<sub>i</sub> del pilote i dentro de un grupo puede calcularse de la expresión:

$$\rho_i = \rho_1 \left( Q_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k Q_j \alpha_{ij} \right)$$

Donde:

- $\rho_i$  = asentamiento del pilote  $i$  bajo carga unitaria.
- $Q_i$  = carga del pilote  $i$ .
- $Q_j$  = carga en el pilote  $j$ , donde  $j$  es cada uno de los otros pilotes en el grupo, en turno.
- $\alpha_{ij}$  = es el factor de interacción entre los pilotes  $i$  y  $j$ . El valor de  $\alpha$  depende del espaciamiento de los pilotes y se obtiene de la Figura 3.3.

Aunque el gráfico está dibujado para  $\nu = 0.5$ , el valor de  $\nu$  no es crítico, pudiendo ser utilizado para todos los valores de  $\nu$ .

Para un pilote individual dentro de un grupo, se encuentra usualmente que el asentamiento del pilote debido a la influencia de los pilotes vecinos excede al asentamiento producido por la carga en el pilote. De este modo, aunque el asentamiento de un pilote individual pueda parecer pequeño en un ensayo de carga, el asentamiento de una estructura apoyada en un grupo de pilotes similares puede ser bastante grande.

El proceso de añadir las interacciones de cada pilote con los otros en un grupo grande de pilotes puede ser tedioso y tomar tiempo. Sin embargo, se encuentra que la mayor parte de pilotes en el grupo está tan lejos que su influencia pueda ignorarse, o quizás se puede asignar una participación para el efecto de todos los pilotes mas allá de determinada distancia del pilote en estudio.

Cuando los pilotes no son de la misma longitud, el efecto en la relación (H/L) es pequeño, por lo que el método todavía puede utilizarse. Cuando los pilotes tienen diferentes diámetros o anchos, la relación (S/B) del pilote  $j$  deberá usarse para obtener el valor de  $\alpha_{ij}$ .

### 3.3 Asentamiento de un Pilote Individual en Arena o Grava

El asentamiento de un pilote hincado en suelo granular denso es muy pequeño y debido a que el asentamiento en suelo granular es rápido, generalmente no hay problema. En pilotes excavados o pilotes hincados en suelo granular suelto, el asentamiento puede ser significativo, pero no existen métodos aceptados de predecir asentamientos con exactitud. Como una aproximación gruesa, el desplazamiento vertical de un pilote puede estimarse como una carga puntual en la base del pilote.

Sin embargo, el único método confiable para obtener la deformación de un pilote en un suelo granular es ejecutar un ensayo de carga.

### 3.4 Asentamiento de un Grupo de Pilotes en Arena o Grava

Una aproximación al asentamiento de un grupo de pilotes en suelo granular en base al asentamiento de un pilote individual puede obtenerse de la Figura 3.4, donde

$$\alpha = \frac{\text{(asentamiento del grupo de pilotes)}}{\text{(asentamiento del pilote individual bajo la misma carga de trabajo)}}$$

### 3.5 Un Método Simple para Estimar el Asentamiento de un Grupo de Pilotes

El asentamiento promedio de un grupo de pilotes puede estimarse tratando al grupo como una cimentación equivalente con un área en planta igual al área del grupo.

Para pilotes que trabajan predominantemente por punta (arenas), se asume que la cimentación estará en la base de los pilotes. Para pilotes por fricción (arcillas), se asume los dos tercios de la longitud de empotramiento, y si existe una capa superior granular o arcilla blanda, los dos tercios de la profundidad de empotramiento en la arcilla portante. Lo anterior se ilustra en la Figura 3.5.

### 3.6 Compresión del Pilote

La compresión del pilote puede ser una parte significativa del asentamiento total, pero, a diferencia del asentamiento por consolidación, ocurrirá instantáneamente cuando se aplica la carga al pilote. Se puede evaluar asumiendo que bajo la carga de trabajo ( o carga de ensayo), las proporciones de la carga por fricción y por punta son las mismas que en la falla. Por lo tanto, si la carga última es  $Q_u$ , formada por la carga última en el fuste y en la punta, luego bajo la carga  $Q$ ,

$$Q \times \frac{Q_b}{Q_u} \quad \text{será soportado por la punta y}$$

$$Q \times \frac{Q_s}{Q_u} \quad \text{será soportado por fricción.}$$

La carga por punta será transmitida en toda la longitud del pilote y la carga por fricción será reducida con la profundidad. En arcillas, donde la fricción (adhesión) permanece constante con la profundidad, el esfuerzo promedio será la mitad del de la superficie. En arenas, donde la fricción aumenta linealmente con la profundidad, el esfuerzo promedio equivalente será dos tercios del valor de superficie. Por lo tanto, para un pilote de longitud  $L$  y sección  $A_p$ , el esfuerzo promedio equivalente será:

$$\text{en arcillas} \quad \sigma_{pr} = \frac{Q}{A_p} \left( \frac{Q_b + \frac{1}{2} Q_s}{Q_u} \right)$$

$$\text{en arenas} \quad \sigma_{pr} = \frac{Q}{A_p} \left( \frac{Q_b + \frac{2}{3} Q_s}{Q_u} \right)$$

y la compresión elástica del pilote será:

$$\rho_e = \frac{\sigma_{pr} L}{E_p}$$

donde  $E_p$  es el módulo de Young para el material del pilote en la dirección longitudinal.

### 4.0 FORMULAS DE HINCA

Las fórmulas de hincado de pilotes tratan de relacionar la capacidad portante de un pilote con su resistencia al hincado. Aunque desacreditadas por muchos ingenieros, las fórmulas de hincado todavía se utilizan en el sitio, como una verificación de las predicciones de diseño utilizando la mecánica de suelos. No se recomienda el empleo de las fórmulas de hincado en el diseño de pilotes; sin embargo, a pesar de sus limitaciones puede utilizarse para ayudar al ingeniero a evaluar las condiciones del terreno en un pilotaje, revelando probablemente variaciones que no fueron aparentes durante la investigación de campo. Las capacidades de carga de pilotes determinadas en base a las fórmulas de hincado no son siempre confiables. Deben estar apoyadas por experiencia local y ensayos; se recomienda precaución en su utilización.

Existe un gran número de fórmulas de hincado, tal como la muy conocida fórmula del Engineering News Record. La Tabla 4.1 de US Navy (1982) recomienda el empleo de fórmulas de hincado según el martillo a ser utilizado. Estas fórmulas pueden utilizarse como una guía para estimar las capacidades admisibles de los pilotes y como control de construcción cuando están complementadas por ensayos de carga.

**Tabla 4.1: Fórmulas Básicas de Hincado de Pilotes (Design Manual DM 7.2, 1982)**

Para martillos en caída libre	Para martillos de acción simple	Para martillos de doble acción diferencial
$(Q_v)_{ad}^c = \frac{2 WH}{S+1}$	$(Q_v)_{ad}^{a,c} = \frac{2 WH}{S+0.1}$	$(Q_v)_{ad}^a = \frac{2 E}{S+0.1}$
	$(Q_v)_{ad}^{b,c} = \frac{2 WH}{S+0.1} \frac{W_D}{W}$	$(Q_v)_{ad}^b = \frac{2 E}{S+0.1} \frac{W_D}{W}$

- a = usar cuando los pesos hincados son menores que los pesos del martillo.
- b = usar cuando los pesos hincados son mayores que los pesos del martillo.
- c = fórmula de hincado de pilotes basada en la fórmula de Engineering News.
- $(Q_v)_{ad}$  = carga admisible del pilote en libras.
- W = peso del martillo en libras.
- H = altura efectiva de caída en pies.
- E = energía real liberada por el martillo por golpe en pie-libra.
- S = promedio neto de penetración en pulgadas por golpe para las últimas 6 pulgadas del hincado.
- $W_D$  = pesos hincados incluyendo el pilote.
- Nota : la relación de pesos ( $W_D / W$ ) debe ser  $< 3$ .

## 5.0 ENSAYO DE CARGA EN PILOTES

### 5.1 Generalidades

La única manera segura de saber si un pilote es capaz de soportar la carga requerida, es ejecutar un ensayo de carga. Este ensayo también puede utilizarse para medir las características de carga-deformación del pilote. En un trabajo de pilotaje, uno o más pilotes se ensayan; los pilotes de ensayo se seleccionan de manera aleatoria entre los pilotes que se están instalando o pilotes especiales pueden hincarse con antelación para verificar el diseño.

La prueba de carga se realiza generalmente por las siguientes razones, Vesic (1977):

- 1° Verificar experimentalmente que la actual respuesta del pilote a la carga (reflejada en la relación carga-asentamiento) corresponde a la respuesta asumida por el diseñador.
- 2° Que la carga última actual del pilote no es menor que la carga última calculada y que fue usada como base en el diseño de la cimentación.
- 3° Obtener datos del suelo deformado y facilitar el diseño de otro pilote.
- 4° Determinar el comportamiento carga-asentamiento de un pilote, especialmente en la región de carga de trabajo.
- 5° Para indicar la dureza estructural del pilote.

## 5.2 Formas y Tipos de Aplicación de Carga

Los equipos para aplicar la carga a compresión pueden ser los de la norma ASTM-D-1143-81. "Pilotes bajo Carga Axial Estática de Compresión", u otros, construidos de tal forma que la carga sea aplicada al eje central y longitudinal del pilote; el equipo del sistema de carga incluye una gata hidráulica, una bomba hidráulica y manómetros. La norma ASTM menciona los siguientes arreglos o dispositivos para aplicar la carga al pilote:

- 1) Carga aplicada al pilote o grupo de pilotes por gata hidráulica actuando frente a un marco de reacción anclado. Puede realizarse de dos formas, con pilotes de anclaje o con anclaje enterrado.

- a. Pilotes de anclaje.

Se instala un número suficiente de pilotes de anclaje a cada lado del pilote de prueba de tal forma que proporcionen adecuada capacidad de reacción. Dichos pilotes estarán ubicados a una distancia libre del pilote de prueba de al menos 5 veces el mayor diámetro del pilote de prueba, pero no menor que 2 mts. Sobre los pilotes de anclaje va una viga de prueba de medida y resistencia suficiente para impedir una deflexión excesiva, esta viga está sujeta por conexiones diseñadas para transferir la carga a los pilotes. Entre el fondo de la viga y la cabeza del pilote de prueba existe una luz suficiente para poder colocar la gata hidráulica y dos planchas de acero de espesor mínimo de 2"; el sistema trabaja al reaccionar la gata hidráulica al cargar el pilote, transmitiendo esta carga (mediante la viga de reacción) a un par de pilotes de anclaje. La Figura 5.1 muestra este tipo de arreglo.

- b. Anclaje enterrado.

Usualmente transfieren la reacción a estratos más duros debajo del nivel de la punta del pilote, pudiendo ser puestos más cercanamente al pilote de prueba. La Figura 5.2 presenta este tipo de arreglo.

- 2) Carga aplicada al pilote o grupo de pilotes por gata hidráulica actuando frente a caja o plataforma cargada.

La norma ASTM especifica que se debe centrar sobre el pilote o grupo de pilotes una viga de prueba de medidas y resistencia suficiente para impedir una deflexión excesiva bajo carga, permitiendo espacio suficiente entre el cabezal del pilote y el fondo de la viga para poder ubicar las planchas y la gata; los extremos de la viga se deben soportar sobre cajones temporales.

Se centra una caja o plataforma sobre la viga de prueba, la cual estará soportada por durmientes ubicadas tan lejos como sea posible del pilote de prueba, pero en ningún caso la distancia será menor que 1.5 mts de luz entre caras. La carga de la caja o plataforma será de material apropiado tal como suelo, roca, concreto o acero. Con este dispositivo de carga la gata hidráulica reacciona frente a esta carga como lo muestra la Figura 5.3.

- 3) Carga aplicada directamente a un pilote o grupo de pilotes.

La norma ASTM especifica que se debe centrar sobre la plancha de acero una viga de prueba de peso conocido y suficiente medida y resistencia, con los extremos soportados sobre durmientes temporales; centrar una plataforma de peso conocido sobre la viga, esta plataforma es soportada por durmientes ubicadas a una distancia libre no menor de 1.5 mts. La carga de la plataforma puede ser con acero o concreto. La Figura 5.4 muestra este arreglo.

En lo referente al asentamiento de la cabeza del pilote, éste se puede medir de tres formas:

- a) Nivelación directa con referencia a un datum fijado (BM).
- b) Por un alambre sostenido bajo tensión entre dos soportes y pasando a través de una escala pegada al pilote de prueba.

- c) Por medio de vigas de referencia una a cada lado del pilote de prueba, las cuales tienen un mínimo de dos deformómetros, con las espigas paralelas al eje longitudinal del pilote y soportada por orejas firmemente pegadas sobre los lados del pilote debajo de la plancha de prueba; alternativamente, los dos deformómetros podrían montarse en lados opuestos del pilote de prueba, pero encima de las vigas de referencia; estos deformómetros deberían tener una precisión de al menos 0.01 pulgadas (0.25 mm).

### 5.3 Procedimiento de Carga

Existen diversos tipos de procedimientos de carga, la norma ASTM-D-1143-81 resume la mayoría de éstos, pero tan sólo se presentarán los más comunes, que son:

- a) Prueba de carga mantenida.
- b) Razón de penetración constante.

- a) Prueba de carga mantenida.-

LLamada también ML y es el denominado por el ASTM-D-1143-81 como el procedimiento estándar de carga; el procedimiento a seguir es el siguiente: Siempre y cuando no ocurra la falla primero, cargar el pilote hasta 200% de su carga de diseño, aplicando la carga en incrementos del 25% de la carga de diseño del pilote. Mantener cada incremento de carga hasta que la razón de asentamiento no sea más grande que 0.01 pulgadas (0.25 mm)/hora, pero no mayor que 2 horas. Si el pilote de prueba no ha fallado, remover la carga de prueba total en cualquier momento después de 12 horas si el asentamiento del tope sobre un período de 1 hora no es más grande que 0.01 pulgadas (0.25 mm); si ocurre lo contrario, permita que la carga total permanezca sobre el pilote por 24 horas. Después del tiempo requerido de espera, remover la carga de prueba en decrementos de 25% de la carga total con 1 hora entre decrementos. Si la falla del pilote ocurre, continúe aplicando carga con la gata al pilote hasta que el asentamiento sea igual al 15% del diámetro del pilote o dimensión diagonal.

- b) Razón de penetración constante.-

Fue un método desarrollado por Whitaker en 1957 para modelos de pilotes (pilotes de prueba preliminares) y posteriormente usado para ensayos de pilotes de tamaño natural; este método también es llamado CRP y tiene la ventaja de ser rápido en su ejecución, no dando tiempo a la consolidación del terreno. El método consiste en hacer penetrar el pilote a una velocidad constante y medir continuamente la fuerza aplicada en la cabeza del pilote para mantener la razón de aplicación. La norma ASTM-D-1143-81 especifica que la razón de penetración del pilote debe ser de: 0.01 a 0.05 pulgadas (0.25 a 1.25 mm)/min. en suelo cohesivo y 0.03 a 0.10 pulgadas (0.75 a 2.5 mm)/min. en suelo granular.

### 5.4 Criterios de Carga de Falla

El criterio más usado para definir la carga de rotura en un gráfico carga vs. asentamiento, es aquel que muestra un cambio brusco en la curva obtenida, pero en la mayoría de los casos, la pendiente de la curva varía gradualmente, no pudiendo establecerse en forma definida la carga de rotura.

Otra observación hecha a este criterio, es que frecuentemente la escala adoptada para el trazado carga vs. asentamiento no es escogida con criterio bien definido. Para uniformizar los criterios de escala, se ha sugerido que la curva carga vs. asentamiento sea escogida de tal forma que la recta que corresponde a la deformación elástica del pilote PL/AE forme un ángulo de 20° con la horizontal. Sin embargo éste no es criterio reglamentado, y en vista de que en mecánica de suelos no existe un criterio uniforme para establecer la carga de rotura se mencionarán algunos de estos criterios.

Los criterios recopilados por Vesic (1975) son:

- 1° Limitando el asentamiento total
  - a) absoluto: 1" (25.4 mm) (Holanda, Código de Nueva York).
  - b) relativo: 10% del diámetro del pilote (Inglaterra)

- 2° Limitando el asentamiento plástico  
 a) 0.25 pulgada (6.35 mm) (AASHTO)  
 b) 0.33 pulgada (8.40 mm) (Magnet)  
 c) 0.50 pulgada (12.7 mm) (Código de Boston)

- 3° Limitando la relación asentamiento plástico/asentamiento elástico a 1.5 (Cristiani y Nielsen).

- 4° Relación máxima  $\frac{\text{Incremento asentamiento elástico}}{\text{Incremento asentamiento plástico}}$

Szechy (1961).

- 5° Limitando la relación asentamiento/carga  
 a) Total 0.01 in/ton (California, Chicago).  
 b) Incremental 0.03 in/ton (Ohio)  
 0.05 in/ton (Raymond Co).

- 6° Limitando la relación asentamiento plástico/carga  
 a) Total 0.01 in/ton (New York)  
 b) Incremental 0.03 in/ton (Raymond Co).

- 7° Relación máxima  $\frac{\text{Incremento asentamiento}}{\text{Incremento de carga}}$  Vesic (1963)

- 8° Curvatura máxima de la curva log W/log Q (De Beer, 1967)

- 9° Postulado de Van der Veen (1953)  $W = \beta \ln \left(1 - \frac{Q}{Q_{\max}}\right)$

Fellenius (1980) recopiló varios criterios de falla aplicables al gráfico carga vs. asentamiento.

- a) Método de Davisson.- La carga límite propuesta es definida como la carga que corresponde a un asentamiento que excede la compresión elástica del pilote por un valor X dado por:

$$X = 3.8 + \frac{D}{120}$$

donde:

D = diámetro (mm)

X = en (mm)

El método de Davisson se aplica a ensayos de velocidad de penetración constante, si se aplica a ensayos con carga mantenida, resulta conservador.

- b) Método de Chin.-

Se admite que la curva carga-asentamiento cerca a la rotura es hiperbólica. En este método el asentamiento es dividido por su correspondiente carga y el gráfico pasa a ser una curva de asentamiento/carga vs. asentamiento. Los puntos obtenidos tienden a formar una recta y la inversa de la pendiente es la carga de rotura. Este método se aplica a pruebas rápidas o lentas, ya que el tiempo de aplicación de los estados de carga es constante.



c) Método de De Beer.-

La curva carga vs. asentamiento es llevada a un gráfico log-log. Para los valores de carga mayores, los puntos tienden a caer en dos rectas y su intersección es la carga de rotura.

d) Criterio de 90% de Brinch-Hansen.-

La carga de rotura será aquella cuyo asentamiento es el doble del asentamiento medido para una carga que corresponde al 90% de la carga de rotura.

e) Método de Fuller y Hoy.-

De acuerdo a este criterio, la carga de rotura es aquella que corresponde al punto en la curva carga-asentamiento tangente a una recta de inclinación 0.05 in/ton.

f) Método de Butler y Hoy.-

La carga de rotura es definida como aquella correspondiente al punto de intersección de dos rectas tangentes, la primera corresponde a la tangente a la curva y que tenga una inclinación de 0.05 in/ton. y la segunda recta tangente es aquella paralela a la línea de compresión elástica del pilote y tangente a la curva.

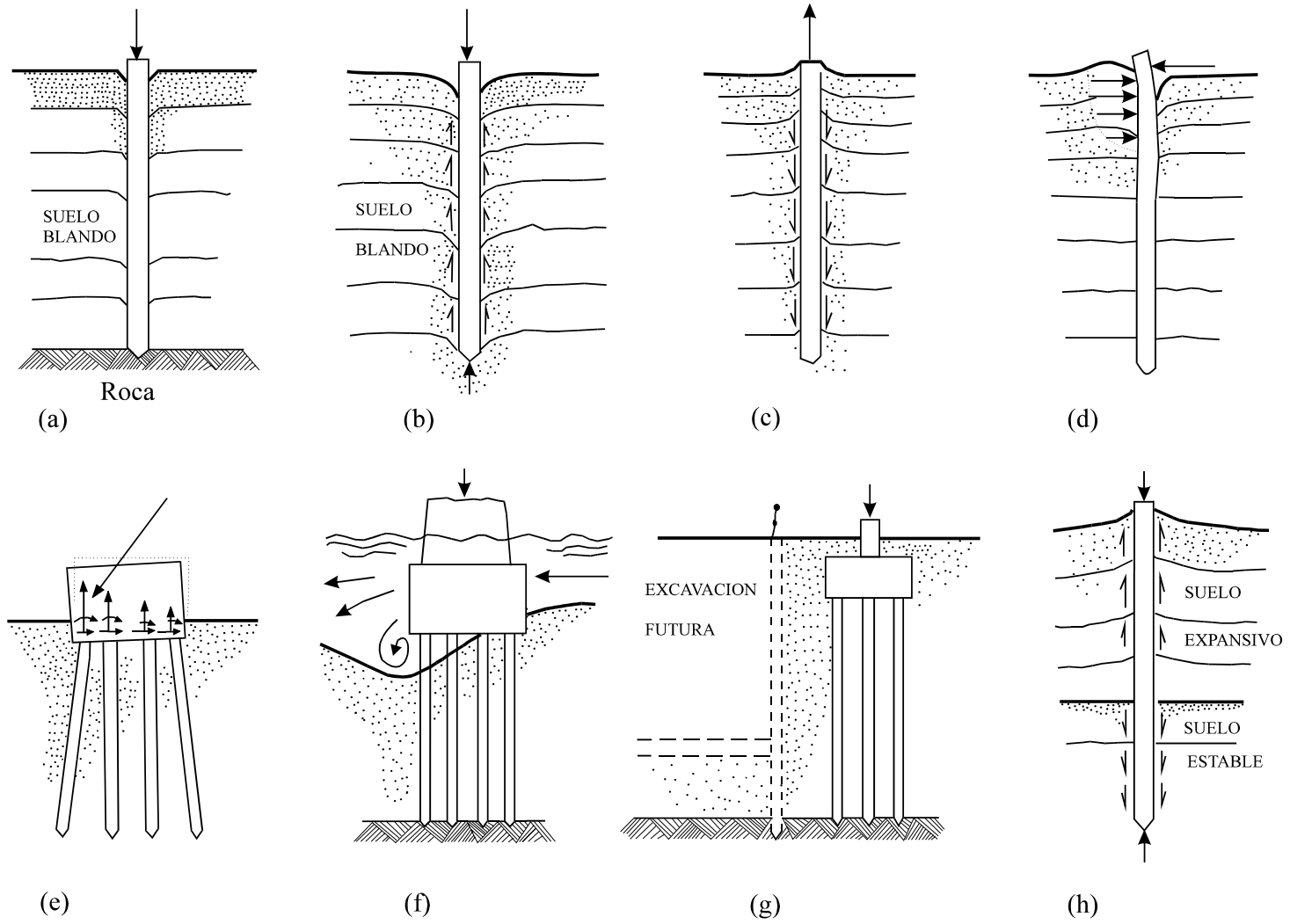
En las Figuras 5.5 y 5.6 se presenta la descripción gráfica de los distintos criterios para evaluar la carga de falla.

## REFERENCIAS

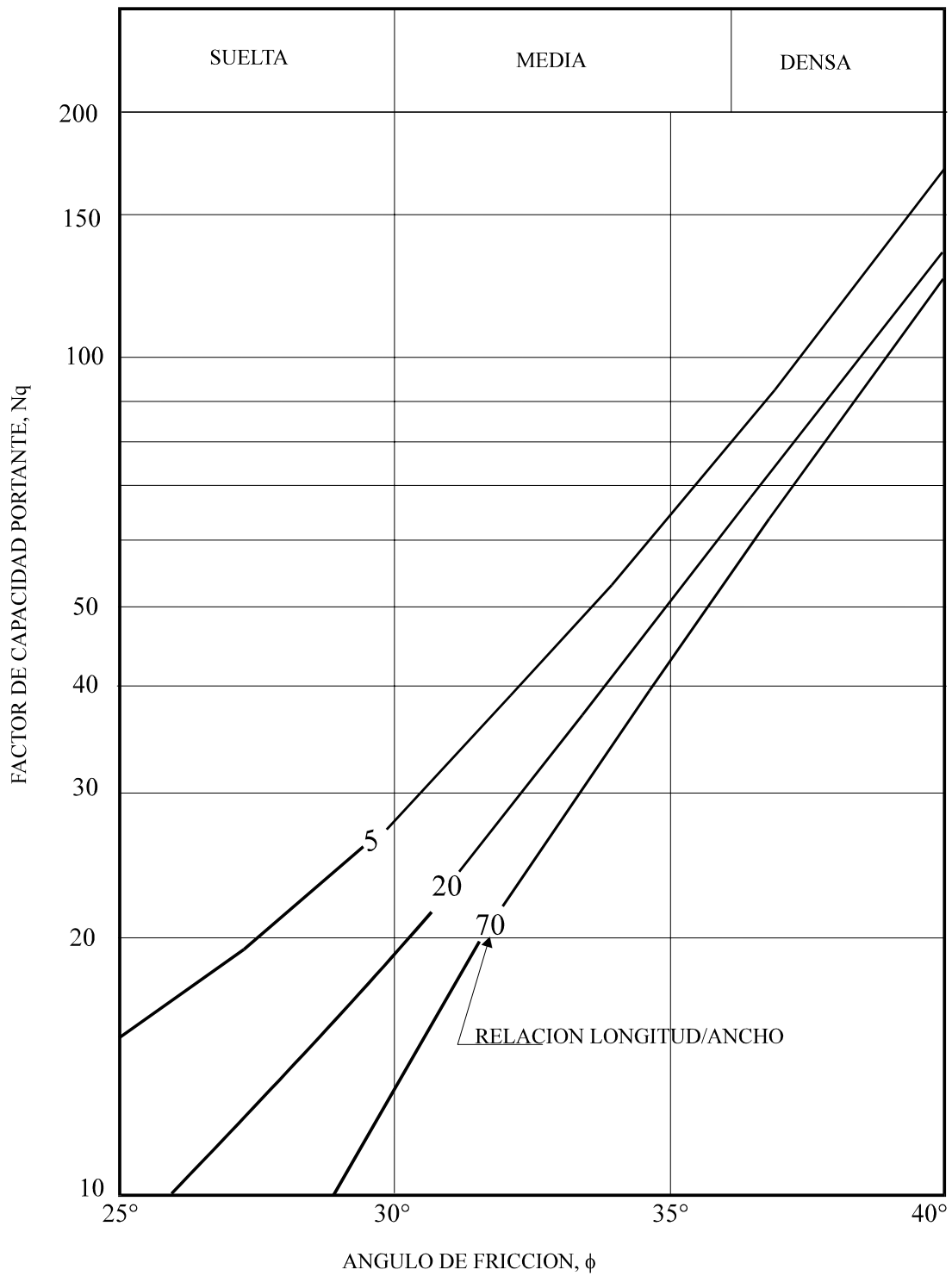
- 1) Aoki N. y Velloso D.A. (1975), "Un Método Aproximado para Calcular la Capacidad de Carga de Pilotes", V Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Buenos Aires, Argentina, pp 367-376.
- 2) Berezantsev V.G. (1961), "Load Bearing Capacity and Deformation of Piled Foundations", 5th International Conference on Soil Mechanics, Paris.
- 3) Bortolucci A.A., Albiero J.H. y Gonzaga S.C. (1988), "Programa para Cálculo de Capacidade de Carga em Estacas Fórmulas Empíricas", Simposio sobre Aplicaciones de Microcomputadores en Geotecnia, Microgeo 88, Brasil.
- 4) Broms B. (1966) "Methods of Calculating the Ultimate Bearing Capacity of Piles, a Summary", Sols-Soils, Vol. 5.
- 5) Carter M. (1983), "Geotechnical Engineering Handbook", Pentech Press, London.
- 6) Decourt L. (1982), "Prediction of the Bearing Capacity of Piles Based Exclusively on N Values of the SPT", 2nd European Symposium of Penetration Testing, Amsterdam.
- 7) Decourt L. y Quaresma A.R. (1978), "Capacidad de Carga de Pilotes a partir de Valores de SPT", 6to. Congreso Brasileiro de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Río de Janeiro.
- 8) De la Cruz J.C. (1988), "Cimentaciones Piloteadas. Análisis y Diseño", Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- 9) Fellenius B.T. (1980), "The Analysis of Results from Routine Pile Load Tests", Ground Engineering, September, pp 19-31.
- 10) Guillén N. (1993), "Capacidad Ultima de Carga de Pilotes en Carga Axial", Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- 11) Meyerhof G.G. (1952), "The Ultimate Bearing Capacity of Foundations", Geotechnique, Vol. 2, No. 4.
- 12) Meyerhof G. G.(1976), "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundation", Eleventh Terzaghi Lecture, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, GT3, pp 195-228.
- 13) NAVFAC DM-7 (1982), "Design Manual Soil Mechanics, Foundations and Earth Structures", Department of the Navy, Naval Facilities Engineering Command, U.S. Navy.
- 14) Nordlund R.L. (1963), "Bearing Capacity of Piles in Cohesionless Soils", JSMFD, ASCE, May.
- 15) Nordlund R.L. (1982), "Dynamic Formula for Pressure Injected Footings", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 108, GT3, pp 419-437.
- 16) Nottingham L.C. y Renfro R.H. (1972), "A Computer Program to Estimate Pile Load Capacity from Standard Penetration Test Results", Florida Department of Transportation, Research Bulletin 121-B.
- 17) Nottingham L.C. (1975), "Use of Quasi-Static Friction Cone Penetrometer Data to Predict Load Capacity of Displacement Piles ", PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Florida, USA.
- 18) Poulos H.G. y Davis E.H. (1974), "Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics", John Wiley,

New York.

- 19) Poulos H.G. y Davis E.H. (1980), "Pile Foundation Analysis and Design", John Wiley, New York.
- 20) Prakash S. y Sharma H.D. (1990), "Pile Foundations in Engineering Practice", John Wiley, New York.
- 21) Schmertmann J. (1967), "Guidelines for Use in the Soil Investigation and Design of Foundations for Bridge Structures in the State of Florida", Florida Department of Transportation, Research Bulletin 121.
- 22) Sayed S.M. y Bakeer R.M. (1992), "Efficiency Formula for Pile Groups", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 2, pp 278-300.
- 23) Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (1989). "Manual de Diseño y Construcción de Pilas y Pilotes", Mexico D.F.
- 24) Tomlinson M.J. (1975), "Foundation Design and Construction", Pitman, London.
- 25) Tomlinson M.J. (1987), "Pile Design and Construction Practice", E & FN SPON, Londres.
- 26) Van Weele A.F. (1957), "A Method of Separating the Bearing Capacity of a Test Pile into Skin-friction and Point-resistance", Proc. 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 2, pp 76-80.
- 27) Velloso P.P.C. (1982), "Cimentaciones - Aspectos Geotécnicos", Vol. 3, Pontificia Universidad Católica, Río de Janeiro.
- 28) Vesic A.S. (1977), "Design of Pile Foundations", National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- 29) Whitaker T. (1957), "Experiments with Model Pile Group", Geotechnique, Vol. 7.



**Figura 1.1: CASOS DONDE PUEDEN NECESITARSE PILOTES**



**Figura 2.1: FACTOR DE CAPACIDAD PORTANTE DE BEREZANTSEV,  $N_q$**

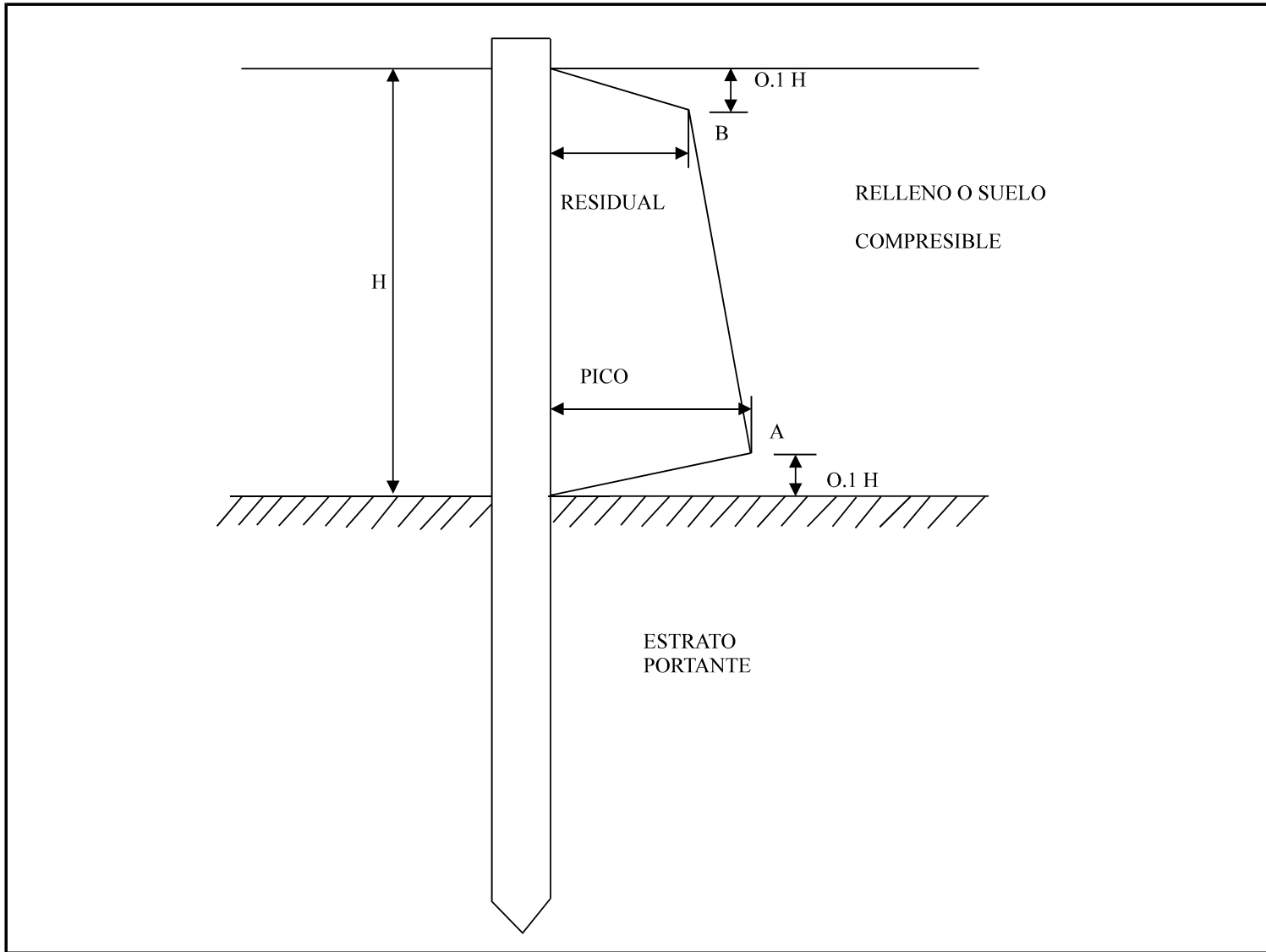
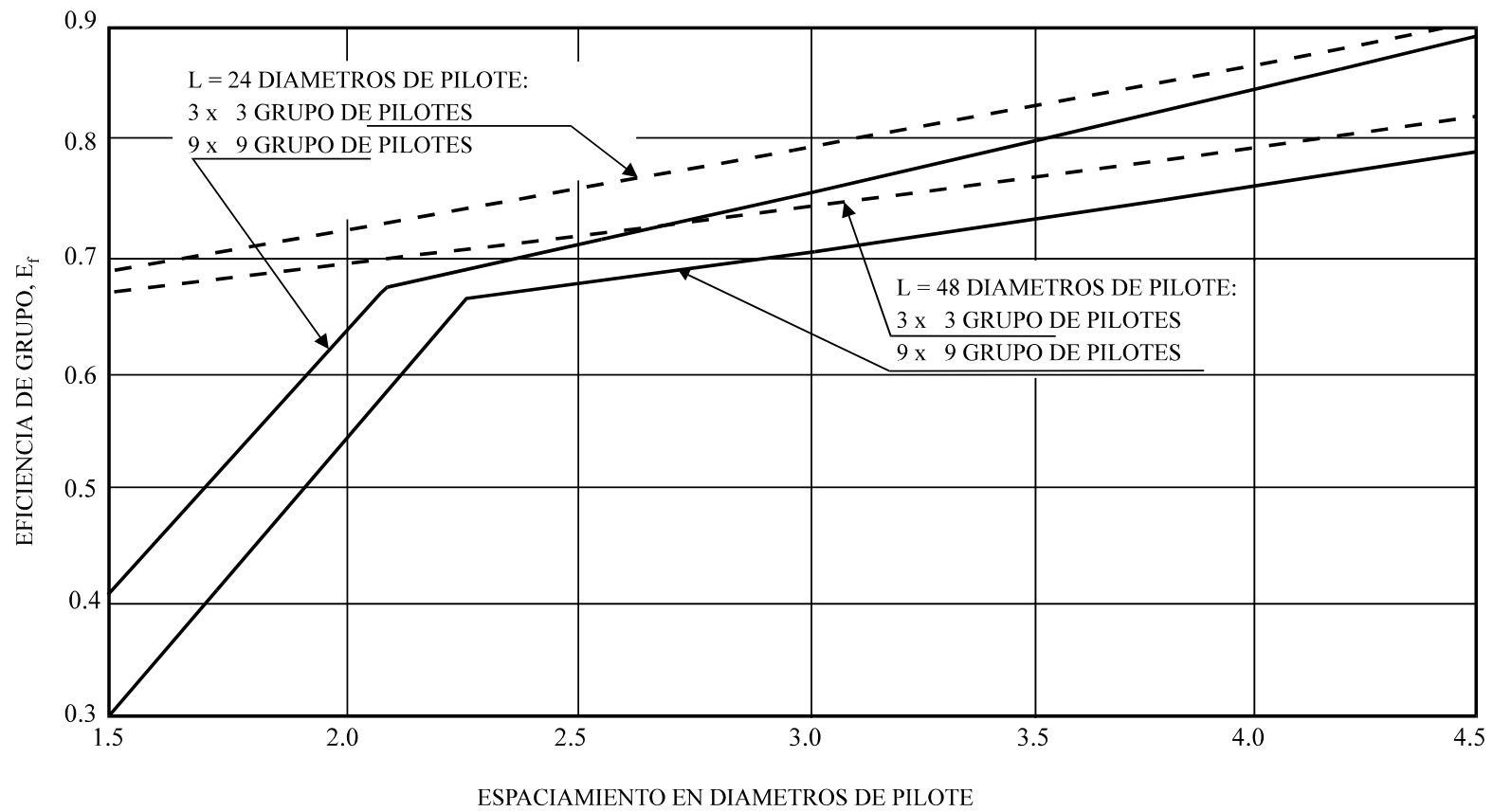
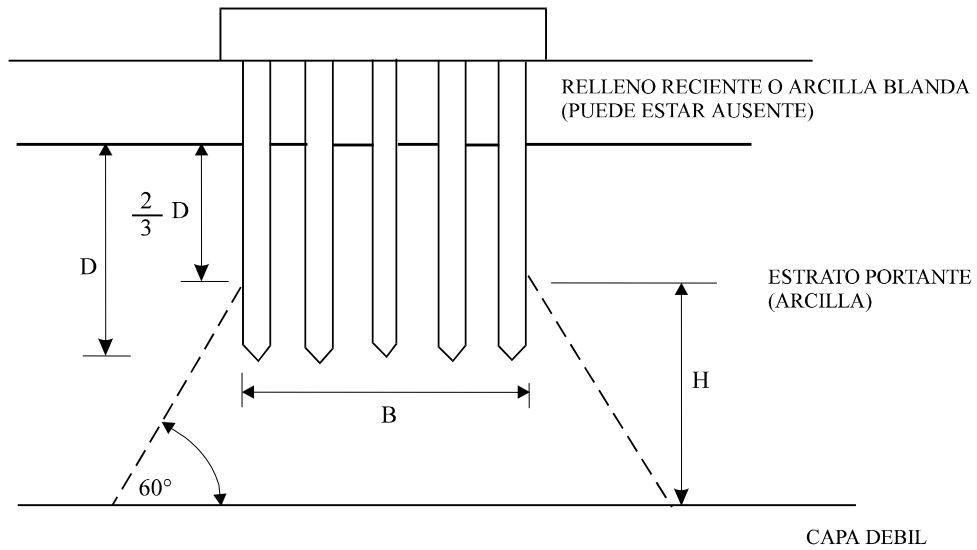


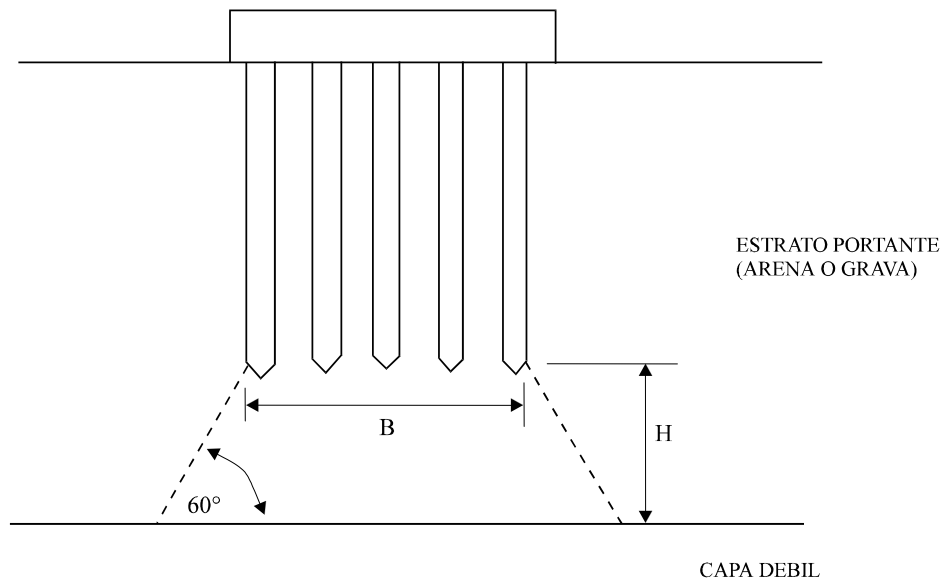
Figura 2.2: DISTRIBUCION ASUMIDA DE LA FRICCION NEGATIVA



**Figura 2.3: EFICIENCIAS DE GRUPO DE PILOTES EN SUELO COHESIVO**

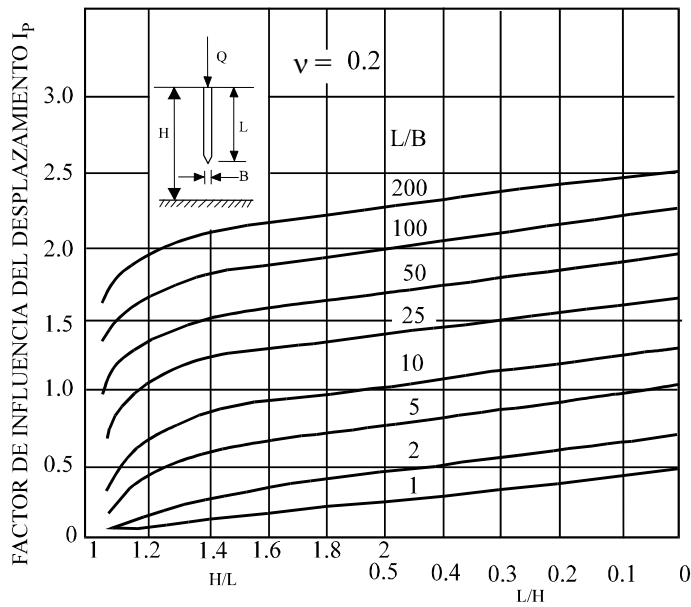


**Figura 2.4: DISTRIBUCION DE CARGA PARA PILOTES DE FRICCION**

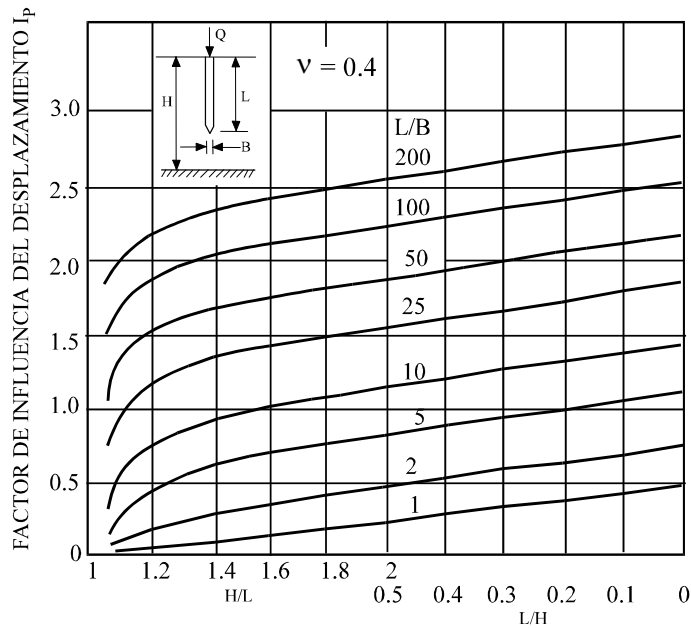


**Figura 2.5: DISTRIBUCION DE CARGA PARA PILOTES DE PUNTA**

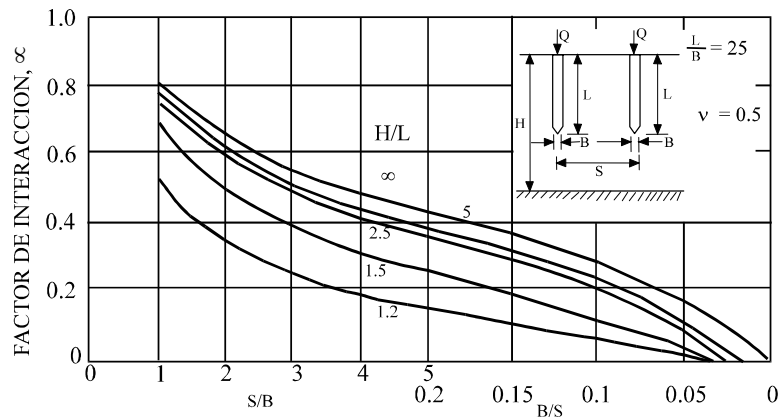




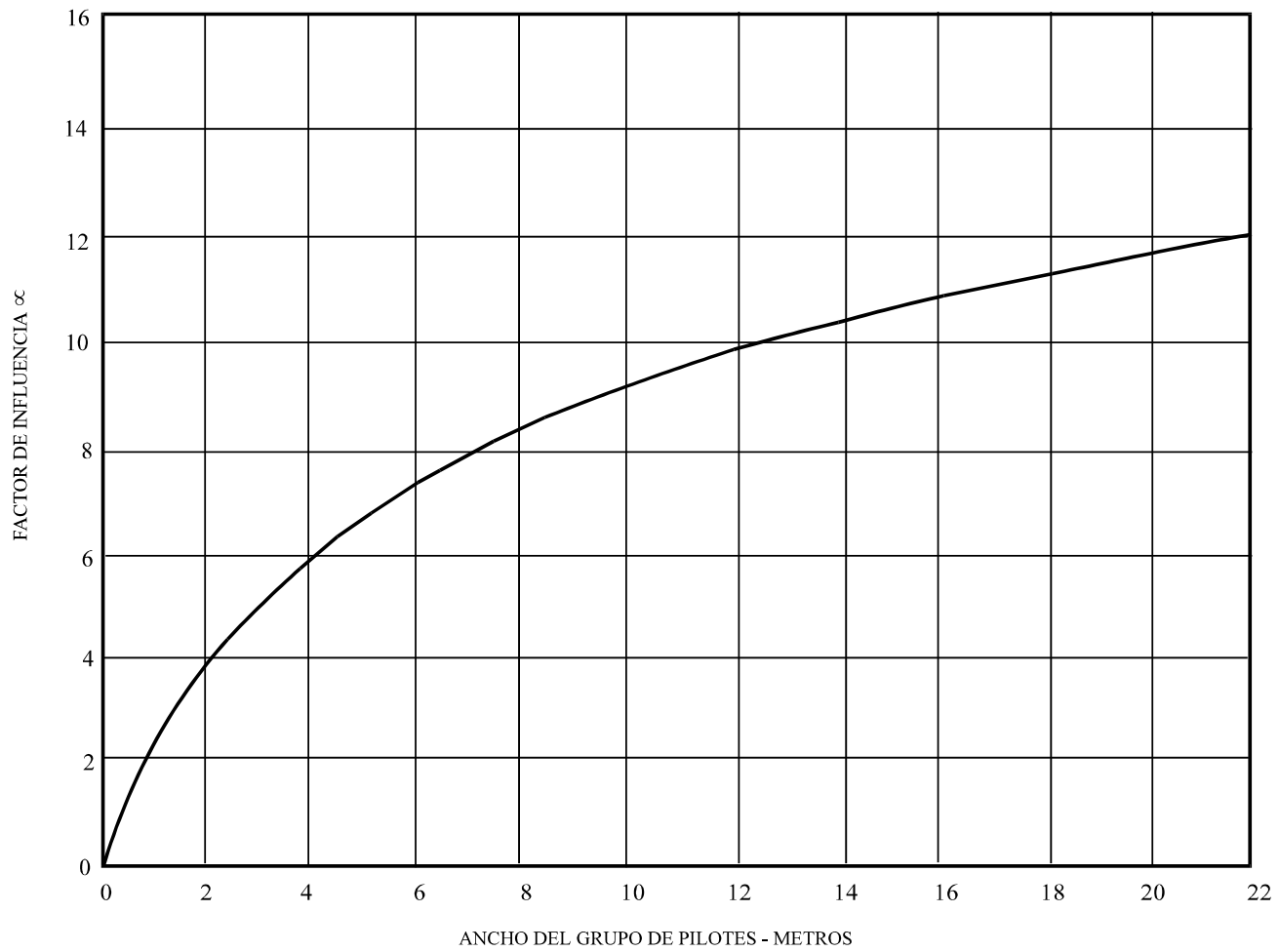
**Figura 3.1: VALORES DEL FACTOR DE INFLUENCIA  $I_p$  PARA UN PILOTE EN UN ESTRATO COMPRESIBLE DE PROFUNDIDAD FINITA,  $v = 0.2$**



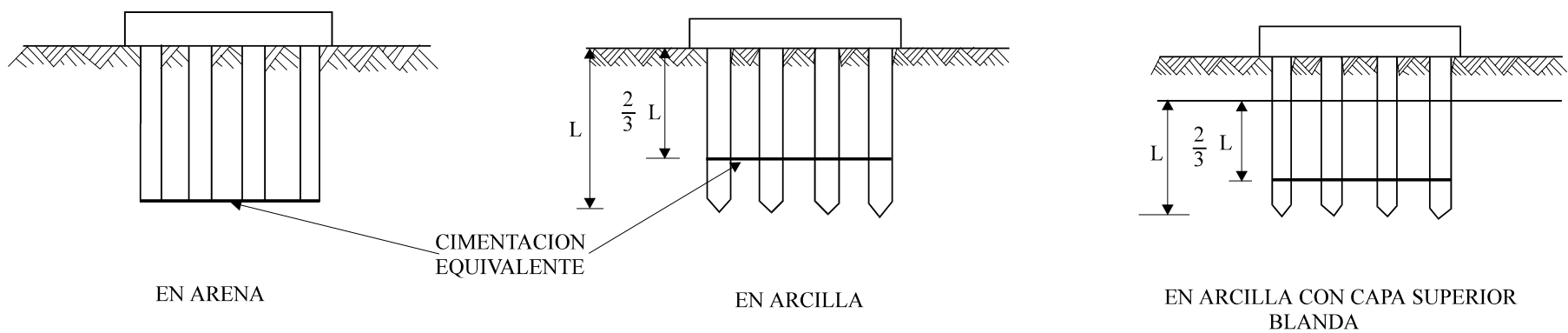
**Figura 3.2: VALORES DEL FACTOR DE INFLUENCIA  $I_p$  PARA UN PILOTE EN UN ESTRATO COMPRESIBLE DE PROFUNDIDAD FINITA,  $v = 0.4$**



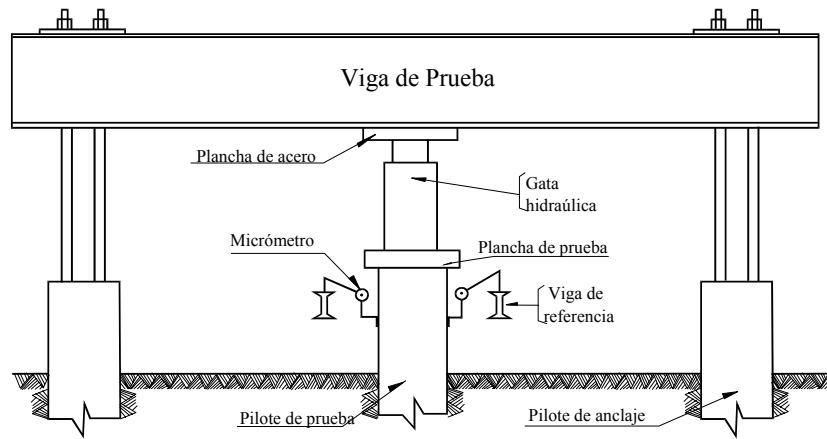
**Figura 3.3: VALORES DEL FACTOR DE INTERACCION  $\alpha$  PARA PILOTES EN UN ESTRATO COMPRESIBLE DE PROFUNDIDAD FINITA**



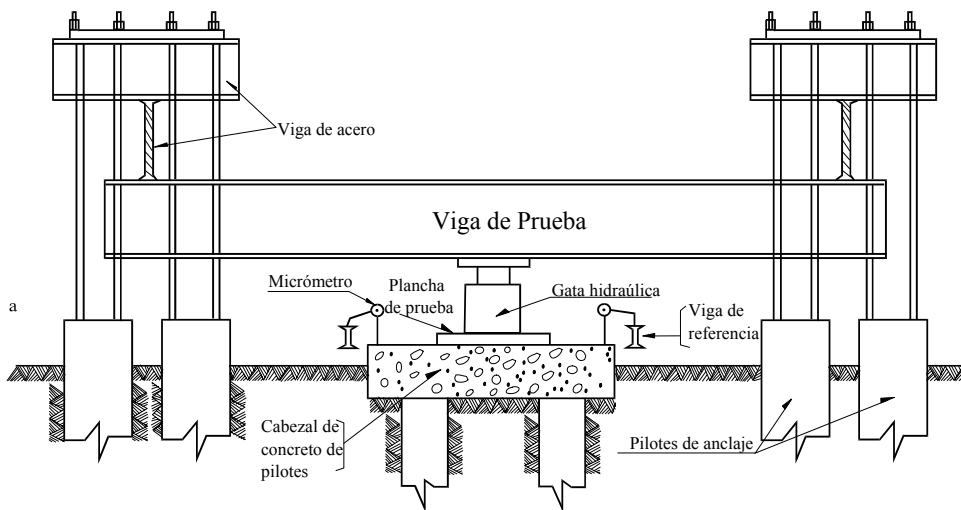
**Figura 3.4: RELACION DEL ASENTAMIENTO DEL GRUPO DE PILOTES AL ASENTAMIENTO DE UN PILOTE**



**Figura 3.5: METODO SIMPLIFICADO PARA ESTIMAR EL ASENTAMIENTO DEL GRUPO DE PILOTES MEDIANTE LA CIMENTACION PROFUNDA EQUIVALENTE**

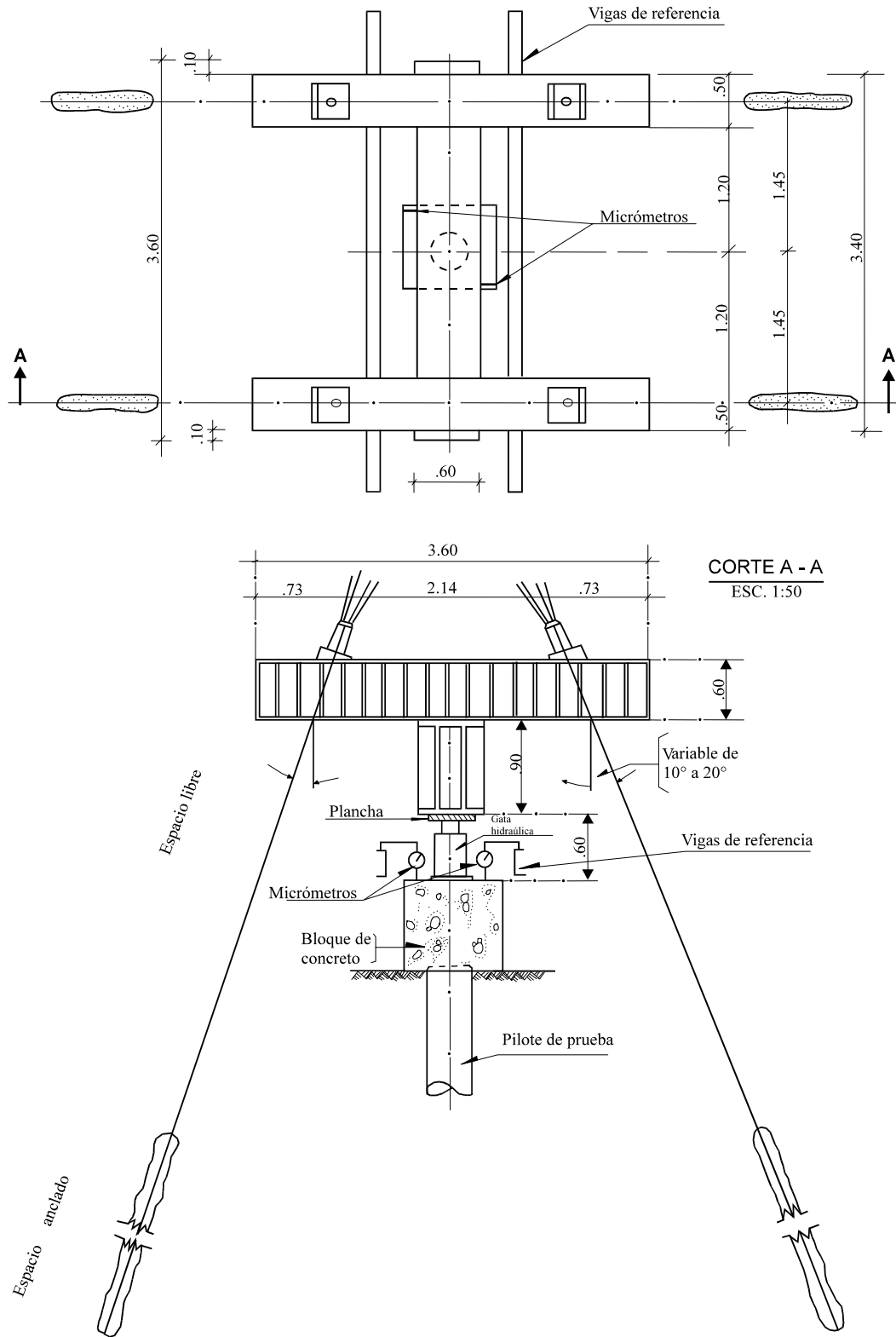


a) Pilote simple

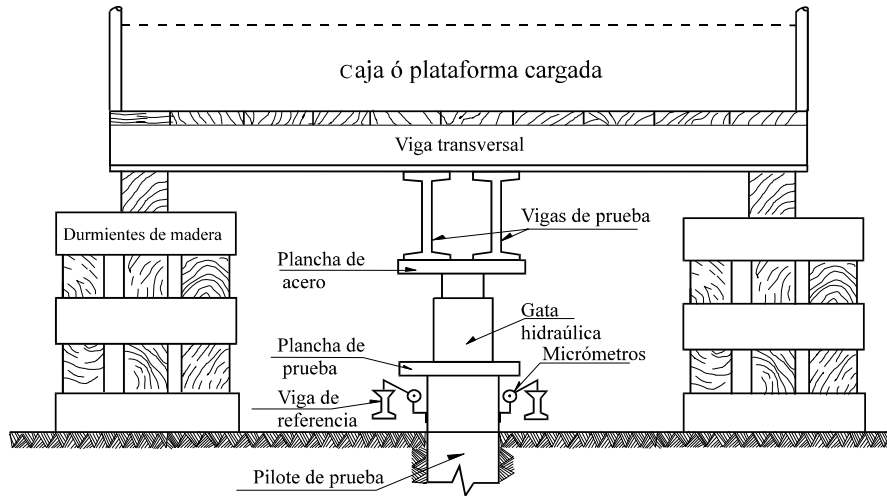


b) Grupo de pilotes

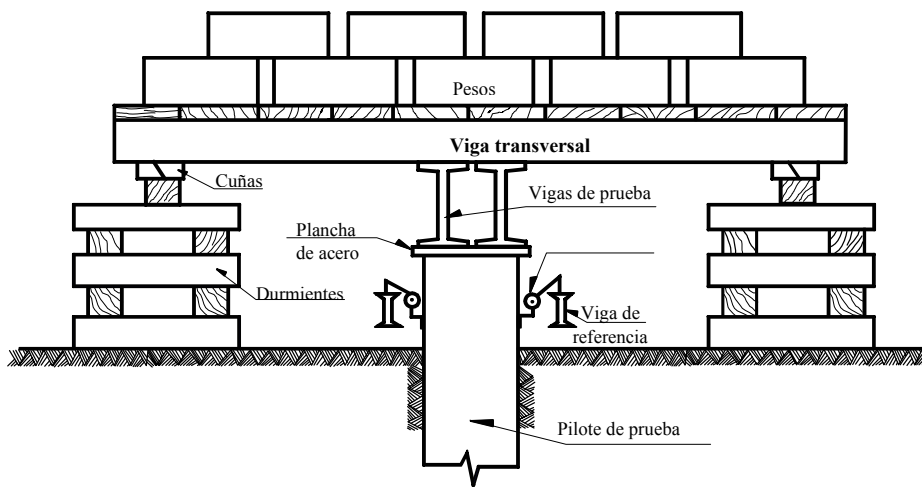
**Figura 5.1: SISTEMA DE MARCO DE REACCION PARA PILOTES DE ANCLAJE**



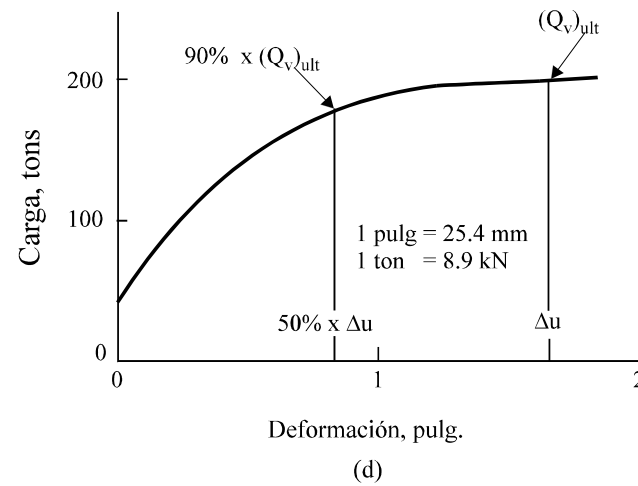
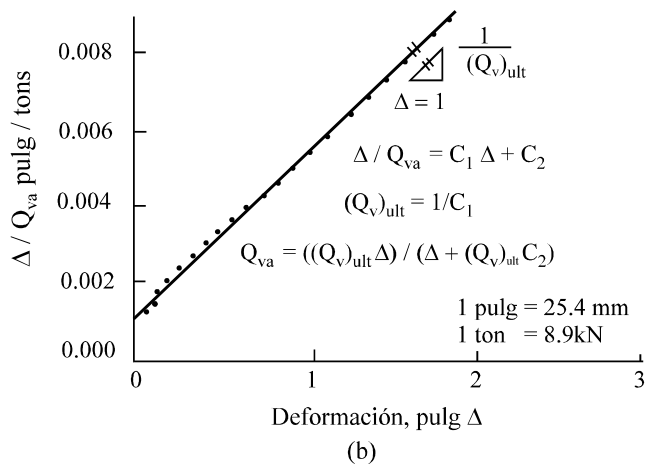
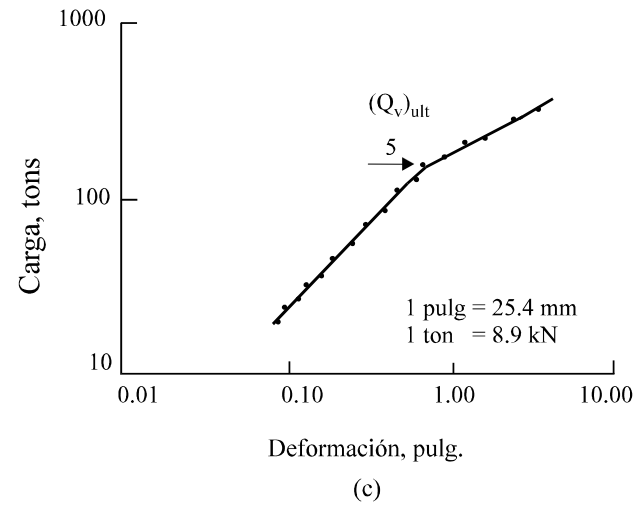
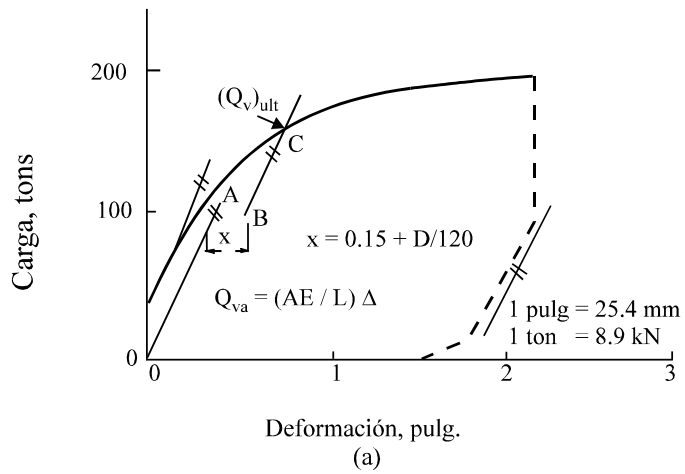
**Figura 5.2: PRUEBA DE CARGA CON ANCLAJES ENTERRADOS**



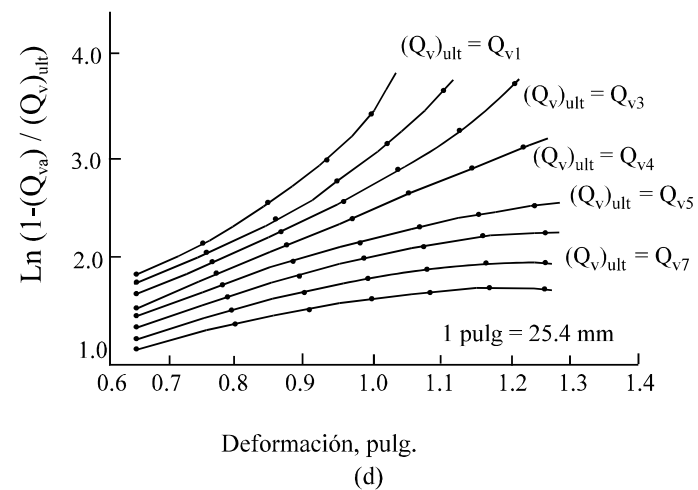
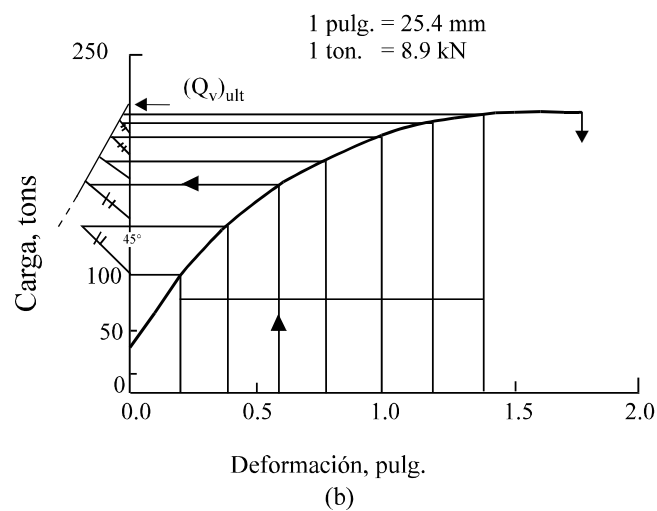
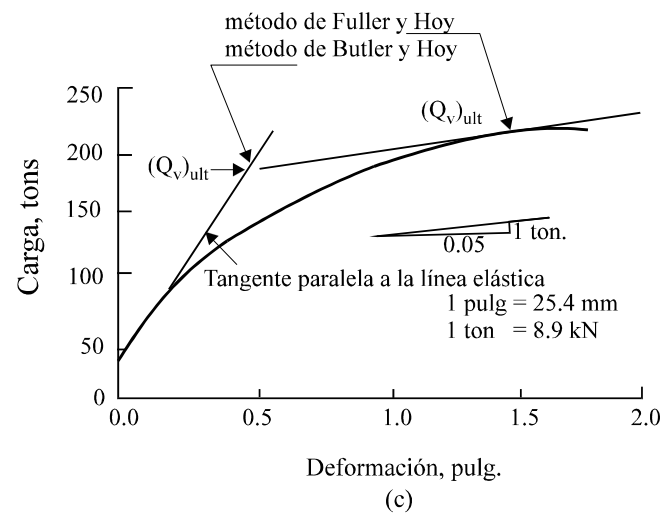
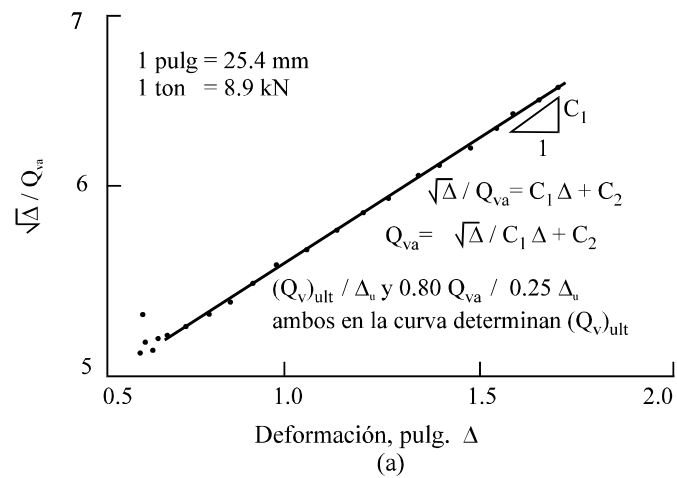
**Figura 5.3: SISTEMA DE APLICACION DE CARGA POR GATA HIDRAULICA ACTUANDO FRENTE A PLATAFORMA CARGADA**



**Figura 5.4: SISTEMA DE APLICACION DE CARGA DIRECTAMENTE AL PILOTE USANDO UNA PLATAFORMA CARGADA**



**Figura 5.5: EVALUACION DE ENSAYOS DE CARGA: a) método de Davisson b) método de Chin c) método de De Beer d) método de Hansen al 90%**



**Figura 5.6: EVALUACION DE ENSAYOS DE CARGA:**  
 a) método de Hansen al 80%    b) método de Mazurkiewicz  
 c) método de Fuller y Hoy y Butler y Hoy    d) método de Vander Veen



## ANEXO

### PROGRAMA DE COMPUTO PARA EL CALCULO DE LA CAPACIDAD ULTIMA DE PILOTES BAJO CARGA AXIAL

#### 1.0 INTRODUCCION

El programa está basado en la utilización de fórmulas empíricas para el cálculo de la capacidad última de pilotes individuales. Estas fórmulas se aplican a tipos de suelos agrupados de acuerdo a la clasificación propuesta por Aoki-Velloso (1975). P.P. Velloso (1982) establece correlaciones sólo para suelos de dos clases y Meyerhof (1976) sólo se aplica a suelos no cohesivos y limos no plásticos. Los factores de seguridad los proporciona el usuario y se usan en todas las fórmulas con excepción de la de Decourt-Quaresma, donde el FS es 1.3 para carga por fricción y 4.0 para carga por punta. El programa fue presentado originalmente por Bortolucci et al (1988) y modificado por Guillén (1993).

#### 2.0 SIMPLIFICACIONES ADOPTADAS

Se adoptan en el programa las siguientes simplificaciones:

- (1) El valor del ensayo SPT en el primer metro del sondaje siempre se considera igual a cero : SPT (0) = 0.
- (2) El valor de SPT se relaciona al metro inmediatamente inferior, es decir SPT (1) corresponde a un intervalo entre 1.0 y 2.0 m. de profundidad del sondaje.
- (3) En la transición de estratos se adoptan los parámetros del estrato superior, si la transición ocurre después de 0.5 m.; en caso contrario, los parámetros que se adoptan son del estrato inferior y el valor del SPT será el que corresponde al metro subsiguiente. Con relación a la última simplificación, es importante un análisis más cuidadoso de los resultados en los niveles de transición y también evitar la introducción de estratos menores que un metro de espesor.

#### 3.0 PARAMETROS GENERALES DE ENTRADA DE DATOS

Los datos comunes de entrada para todos los métodos del programa son: número de estratos, profundidad del sondaje, profundidad final de cada estrato, código de suelo de cada estrato (propuesto por Aoki-Velloso), peso específico efectivo de cada estrato, valores del ensayo SPT para cada metro y el factor de seguridad, (no se aplica a la fórmula de Decourt Quaresma, la que fija 1.3 para carga lateral y 4.0 para carga por punta).

Los factores de correlación indicados en la Tabla A-1, son definidos por el propio programa, en función al tipo de suelo.

Con relación a las características del pilote se establecen los siguientes datos: cota superficial del pilote, diámetro del fuste (o dimensión del lado en el caso de una sección cuadrada) y el diámetro de la base, en caso de un alargamiento de la misma.

**TABLA A-1 : FACTORES DE CORRELACION**

TIPO DE SUELO	CODIGO	AOKI-VELLOSO			DECOURT-QUARESMA	P.P.VELLOSO (*)		
		Kp (KPa)	$\alpha$ (%)	KI (KPa)	K (KPa)	a (KPa)	b'	a' (KPa)
Arena	100	1000	1.4	14.00	400	600	1.00	5.0
Arena Limosa	120	800	2.0	16.00	400	500	1.00	8.5
Arena Limosa-Arcillosa	123	700	2.4	16.80	400	500	1.00	8.5
Arena Arcillosa	130	600	3.0	18.00	400	500	1.00	8.5
Arena Arcillosa-Limosa	132	500	2.8	14.00	400	500	1.00	8.5
Limo	200	400	3.0	12.00	200	430	1.00	10.0
Limo Arenoso	210	550	2.2	12.10	250	430	0.87	10.0
Limo Arenoso-Arcilloso	213	450	2.8	12.60	250	430	0.87	10.0
Limo Arcilloso	230	230	3.4	7.82	200	430	1.00	10.0
Limo Arenoso-Arcilloso	231	250	3.0	7.50	200	430	1.00	10.0
Arcilla	300	200	6.0	12.00	120	250	1.00	6.3
Arcilla Arenosa	310	350	2.4	8.40	120	250	1.00	6.3
Arcilla Arenosa-Limosa	312	300	2.8	8.40	120	250	1.00	6.3
Arcilla Limosa	320	220	4.0	8.80	120	250	1.00	6.3
Arcilla Limosa-Arenosa	321	330	3.0	9.90	120	250	1.00	6.3

(\*) el parámetro b se asume igual a 1.00 para todos los suelos.

Los métodos usados son los siguientes:

**(1) METODO DE AOKI-VELLOSO**

La entrada de datos para el cálculo basado en el método de Aoki-Velloso se empieza a través de los parámetros relativos al tipo de pilote F1 y F2. Estos valores son proporcionados por el usuario y se indican en la Tabla A-2.

**TABLA A-2 : PARAMETROS RELATIVOS AL TIPO DE PILOTE : AOKI - VELLOSO**

TIPO DE PILOTE	F1	F2
FRANKI	2.50	5.0
ACERO	1.75	3.5
CONCRETO	1.75	3.5
STRAUSS	1.70	3.0
PREMOLDEADO	$1 + \frac{D(\text{cm})}{80}$	2F1
EXCAVADO	3.00	6.0

Los resultados son proporcionados desde 1.00 a 2.00 m. de longitud del pilote hasta la profundidad final del sondaje. Las fórmulas son las siguientes:

$$R_l = \frac{A_{li}}{F2} \times \sum_{i=CA}^l (N_i \times K_{li})$$

$$R_p = A_p \times \frac{K_p \times N_p}{F1}$$

Donde:

- $R_l$  = resistencia lateral
- $A_{li}$  = área lateral por metro lineal de pilote
- $N_i$  = SPT en el punto i
- $K_{li}$  =  $\alpha_i \times K_I$  (factor de correlación)
- CA = cota superficial del pilote
- L = penetración del pilote
- $R_p$  = resistencia por punta
- $A_p$  = área de la punta
- $K_p$  = factor de correlación
- $N_p$  = SPT de la punta

## (2) METODO DE DECOURT-QUARESMA

No existe entrada de datos específicos y los resultados se presentan para longitudes del pilote desde 1.00 m. hasta la profundidad final del sondaje. Las fórmulas usadas son las siguientes:

$$R_l = 10 \times p \times L \times \left[ \frac{|\bar{N}|_{CA}^L}{3} + 1 \right]$$

$$R_p = A_p \times K \times |\bar{N}|_{p-1}^{p+1}$$

Donde:

- $|\bar{N}|_{CA}^L$  = SPT promedio a lo largo del fuste
- p = perímetro del pilote
- K = factor de correlación

$\left| \overline{N} \right|_{P-1}^{P+1}$  SPT promedio en una longitud de 3.0 m. próximos a la punta (1.0 m. encima de la punta, en la punta y 1.0 m. debajo de la punta).

### (3) METODO DE PEDRO PAULO VELLOSO

Se empieza la entrada de datos con los valores de "**lambda**" y "**theta**", que son los factores relativos de carga del pilote y el tipo de pilote. Los valores propuestos son:

PILOTE EN TRACCION	$\lambda = 0.7$
PILOTE EN COMPRESION	$\lambda = 1.0$
PILOTE HINCADO	$\theta = 1.0$
PILOTE EXCAVADO	$\theta = 0.5$

El programa genera el valor de "**beta**" :

$$\beta = 1.016 - \frac{0.016 * D_e}{0.035}$$

El valor de  $\beta$  es menor que 0.2 y  $D_e$  es el diámetro efectivo del pilote. Los resultados se presentan desde una profundidad de "**8D<sub>e</sub>**" hasta una profundidad de "**3.5D<sub>e</sub>**" por encima de la profundidad final del sondaje. Las fórmulas usadas son las siguientes:

$$R_i = A_{11} \times \theta \times \lambda \times \sum_{i=CA}^L (a_i \times N_i^{b_i})$$

$$R_p = A_p \times \beta \times \theta \times \frac{\left| \overline{N_i^b a_i} \right|_{P-8D_e}^P + \left| \overline{N_i^b a_i} \right|_P^{P+3.5D_e}}{2}$$

Donde:

$\left| \overline{N_i^b a_i} \right|_{P-8D_e}^P$  = promedio de los productos  $N^b \cdot a$  desde  $8D_e$  por encima de la punta del pilote hasta la punta del pilote (b se adopta igual a 1)

$\left| \overline{N_i^b a_i} \right|_P^{P+3.5D_e}$  = idem, desde la punta hasta  $3.5 D_e$  por debajo de la punta del pilote.

$D_e$  = diámetro efectivo del fuste del pilote.

#### (4) METODO DE MEYERHOF

La entrada de datos comienza con los parámetros **Mm** y **Nm**, que son los factores relativos a la forma de ejecución del pilote. El autor propone:

TIPO DE PILOTE	Mn	Nm
FRANKI	6	1
PUNTA CONICA	3	1
HINCADO EN SUELOS NO COHESIVOS	2	1
HINCADO EN SUELOS COHESIVOS	> 2	1
EXCAVADO	1	0.3

Los resultados se presentan para longitudes de pilote de 1.0 m. hasta una profundidad de 2.0 m. por encima de la profundidad final del sondaje. Las fórmulas usadas son las siguientes:

$$R_l = M_n \times A_{1l} \times \sum_{i=CA}^L N_i$$

$$R_p = N_m \times A_p \times Q$$

Donde:

Q = es el valor menor entre Q<sub>1</sub> y Q<sub>2</sub>

$$Q_1 = 10 \times T_s \times \left| \bar{N} \right|_{p+1}^{p+D_e}$$

Q<sub>2</sub> = es el valor mayor entre Q<sub>3</sub> y Q<sub>4</sub>

$$Q_3 = T_s \times \frac{Z_b}{D_e} \times \left| \bar{N} \right|_{p-Z_b}^{p-1}$$

$$Q_4 = \frac{T_s}{D_e} \times N_p$$

con:

T<sub>s</sub> = 40 KPa para suelos no cohesivos y

T<sub>s</sub> = 30 KPa para suelos limosos no plásticos y por extensión a todos los demás suelos

Z<sub>b</sub> = longitud del pilote limitada a 10 D<sub>e</sub>

El método de Meyerhof se presenta sin ó con corrección de los valores de SPT, en el último caso se emplean las siguientes fórmulas:

$$N_c = N \quad \text{para } \sigma' < 100 \text{ KPa}$$

$$N_c = 0.77 \times \log_{10} \frac{2000}{\sigma'} \times N \quad \text{para } \sigma' > 100 \text{ KPa}$$

Donde:

N<sub>c</sub> = SPT corregido

σ' = esfuerzo efectivo al inicio del metro considerado