



## CAPITULO V

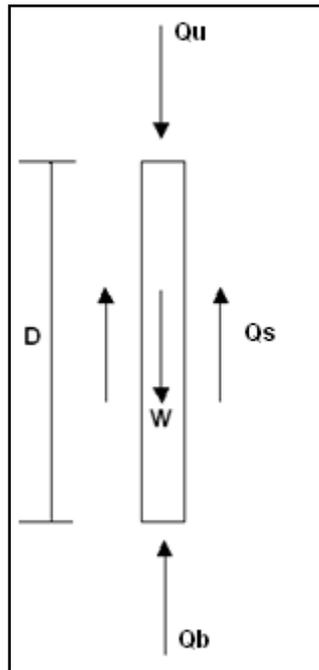
### TEORÍA DE PILOTES ANTE CARGAS ESTÁTICAS

---

#### 5.1 Introducción

La capacidad de carga de un pilote puede ser calculada de dos maneras, la primera por la punta en compresión, que se llama resistencia a punta y la segunda, por esfuerzo cortante a lo largo de una superficie lateral, llamado comúnmente fricción lateral. Los pilotes hincados a través de estratos débiles hasta que descansen en un estrato duro, transfieren la mayor parte de carga por la punta. En suelos homogéneos los pilotes transfieren la mayor parte de su carga por fricción lateral y se los llama pilotes flotantes sin embargo, la mayoría de los pilotes desarrollan ambas resistencias.

En la figura 5.1 se plantea el equilibrio estático de las fuerzas (ecuación 5.1) en un lado se tiene;  $Q_u$  que es la carga última en la cabeza del pilote,  $W$  que es el peso propio del pilote y  $\gamma_m DA_b$  que representa la carga de suelo previamente soportada a nivel de base, que es remplazado por el peso del pilote. En otro lado se hace equilibrio con las resistencias;  $Q_s$  que es la suma de la fricción lateral, más  $Q_b$  la resistencia última en la base.



**Figura 5. 1:** Capacidad de carga por transferencia al suelo

$$Q_u + W - \gamma_m D A_b = Q_s + Q_p \quad (5.1)$$

$Q_s$  y  $Q_b$  se pueden describir como resistencias unitarias de la base y lateral por el área respectiva obteniendo la siguiente expresión. (Whitaker, 1976)

$$Q_u + W - \gamma_m D A_b = f_{su} A_s + q_{bu} A_p \quad (5.2)$$

En donde;  $f_{su}$  es la resistencia unitaria última por fricción lateral,  $q_{bu}$  es la resistencia unitaria neta última en la base,  $A_s$  es el área lateral del pilote sobre la cual se ejerce fricción positiva y  $A_p$  es el área de la punta del pilote.

En muchas situaciones se considera que  $W$  y  $\gamma_m D A_b$  son aproximadamente iguales, lo que permite simplificar dicha expresión (ecuación 5.2) como se muestra en la ecuación 5.3:

$$Q_u = f_{su} A_s + q_{bu} A_p \quad (5.3)$$

## 5.2 Resistencia Unitaria Última de Punta

Los pilotes a punta transmiten cargas a través de agua o suelos blandos hasta estratos con suficiente capacidad portante, por medio del soporte en la punta del pilote. La ecuación de capacidad portante se muestra a continuación.

$$q_{bu} = cN^*_c + q'_v N^*_q \quad (5.4)$$

En donde  $c$  representa la cohesión del suelo y  $q'_v$  el esfuerzo vertical efectivo en el terreno al nivel de la punta,  $N^*_c$  y  $N^*_q$  son factores a dimensionales de capacidad portante adecuados a los pilotes en función del ángulo de resistencia al corte del suelo ( $\varphi$ ).

La carga de punta por consiguiente está en la ecuación 5.5, también en la figura 5.2 se puede observar gráficamente el área de la punta del pilote  $A_p$ :

$$Q_p = A_p(cN^*_c + q'_v N^*_q) \quad (5.5)$$

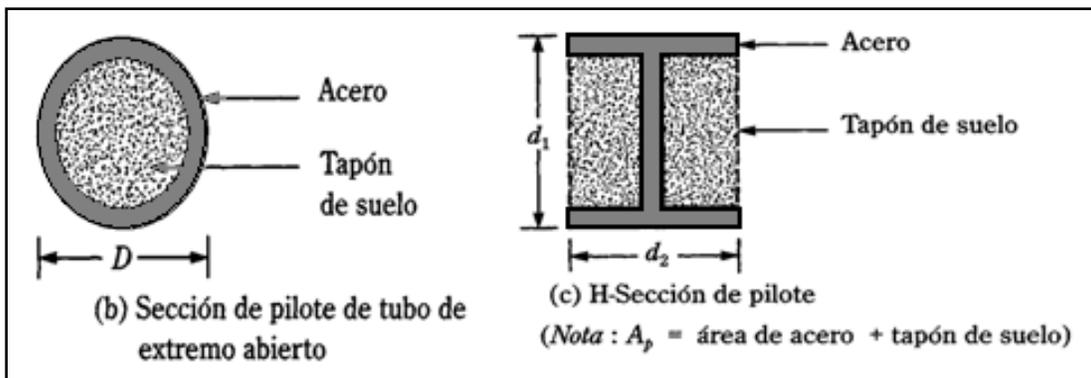
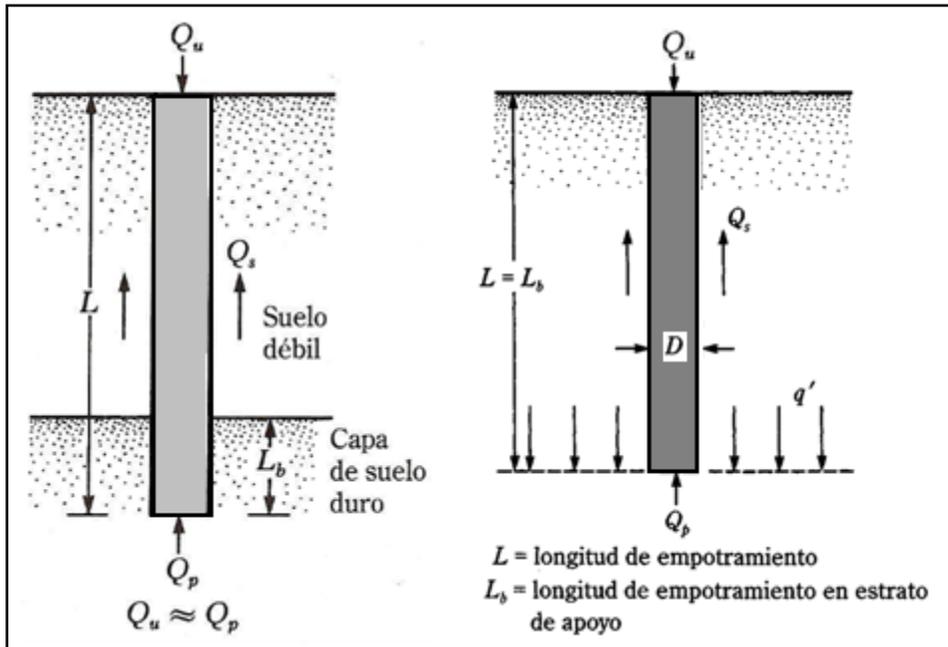


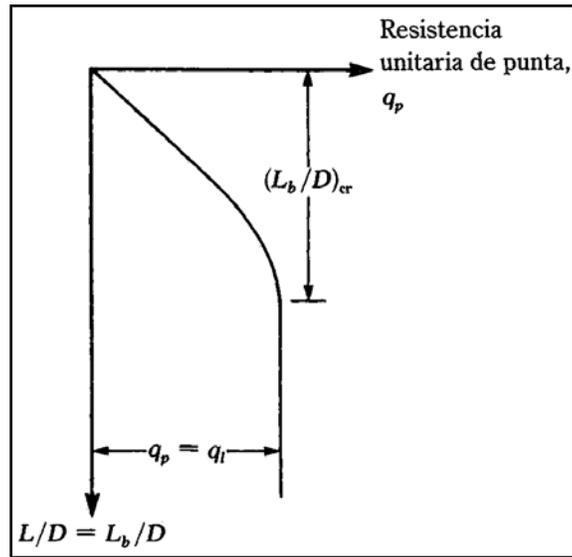
Figura 5. 2: Área de la punta del pilote  $A_p$

### 5.2.1 Método de Meyerhof para estimar $Q_p$ en Arena

La capacidad de carga de punta  $Q_p$  de un pilote en arena generalmente crece con la profundidad de empotramiento en el estrato de apoyo y alcanza un valor máximo para una relación de empotramiento de  $L_b/D = (L_b/D)_{cr}$ , note que en un suelo homogéneo  $L_b$  es igual a la longitud real  $L$  de empotramiento del pilote figura 5.3 (derecha). Sin embargo, en la figura 5.3 izquierda se muestra que el pilote penetra en un estrato de apoyo  $L_b < L$ .



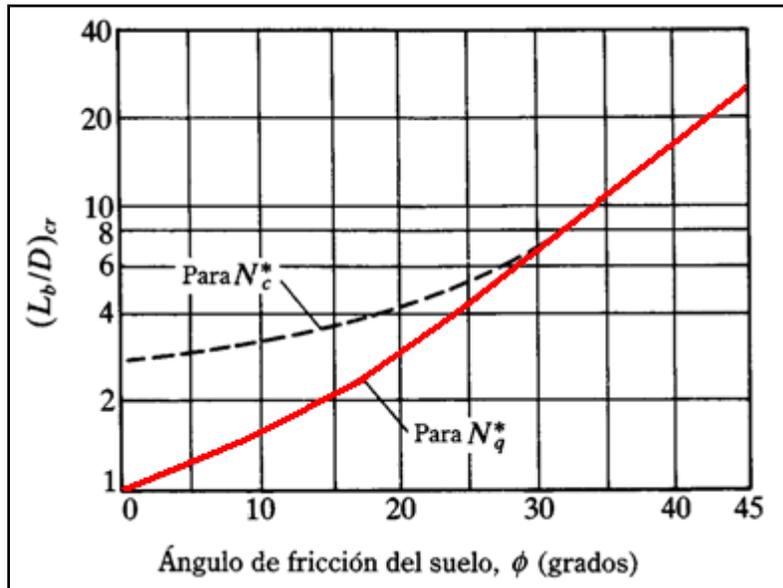
**Figura 5. 3:** Pilotes de punta en suelo duro (Das, 2001)



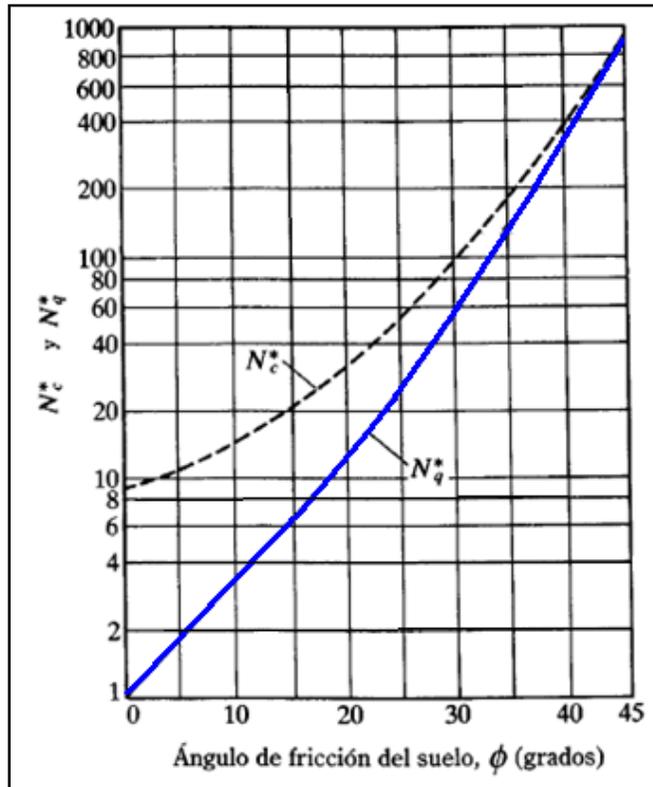
**Figura 5. 4:** Variación de la resistencia unitaria de punta en una arena homogénea (Das, 2001)

Cuando el pilote sobrepasa la distancia de la relación de empotramiento crítico,  $(L_b/D)_{cr}$  el valor de  $Q_p$  permanece constante ( $q_p = q_l$ ), es decir que  $L = L_b$  como se muestra en la figura 5.4 en caso de un suelo homogéneo. La variación de  $(L_b/D)_{cr}$  con el ángulo de fricción del suelo se muestra en la figura 5.5. Con estos antecedentes se puede determinar que los factores de capacidad de carga crecen con  $L_b/D$  y alcanzan un valor máximo en  $L_b/D = 0.5(L_b/D)_{cr}$ . (Meyerhof, 1976)

La figura 5.5 indica que  $(L_b/D)_{cr}$  para  $\phi = 45^\circ$  es aproximadamente de 25 y que decrece al disminuir el ángulo de fricción  $\phi$ . En la mayoría de los casos, la magnitud de  $L_b/D$  para pilotes es mayor que  $0.5(L_b/D)_{cr}$ , por lo que los valores máximos de  $N^*_c$  y  $N^*_q$  serán aplicables para el cálculo de  $Q_p$  en todos los pilotes. La variación de esos valores máximos de  $N^*_c$  y  $N^*_q$  con el ángulo de fricción  $\phi$  se muestra en la figura 5.6.



**Figura 5. 5:** Variación de  $(L_b/D)_{cr}$  con el ángulo de fricción del suelo (según Meyerhof, 1976)



**Figura 5. 6:** Variación de los valores máximos de  $N'_c$  y  $N'_q$ , con el ángulo de fricción del suelo  $\Phi$  (según Meyerhof, 1976)



Para altos valores de  $\varphi$  (mayores que unos  $35^\circ$ ),  $N * q$  crece rápidamente dando lugar a elevadas resistencias en la base de los pilotes. Resultados publicados de pruebas de carga indican valores máximos alcanzados del orden de  $100 \text{ kg/cm}^2$ , valor que puede adoptarse como criterio límite para el análisis. Son posibles valores pico de la resistencia en la base de hasta  $200 \text{ kg/cm}^2$  en suelos con partículas angulosas y duras, pero tales valores no son aconsejables para el diseño a menos que se verifiquen mediante pruebas de carga sobre pilotes instrumentados (Tomlinson, 1981).

Para pilotes en arena,  $c = 0$  la ecuación 5.5 toma la forma simplificada

$$Q_p = A_p (q'_v N * q) \quad (5.6)$$

Sin embargo,  $Q_p$  no debe exceder el valor límite  $A_p q_l$  o sea

$$Q_p = A_p (q'_v N * q) \leq A_p q_l \quad (5.7)$$

Siendo la resistencia límite de punta  $q_l$  igual a:

$$q_l = \frac{KN}{m^2} = 50 N * q \tan \varphi \quad (5.8)$$

Donde  $\varphi$  es el ángulo de fricción del suelo en el estrato de apoyo.

La resistencia de punta última  $Q_p$  en un suelo granular homogéneo ( $L = L_b$ ) se puede obtener de los números de penetración estándar (Meyerhof, 1976)

$$Q_p = \frac{KN}{m^2} = 40 N_{cor} L/D \leq 400 N_{cor} \quad (5.9)$$



Donde  $N_{cor}$  es el número de penetración estándar corregido promedio cerca de la punta del pilote (aproximadamente 10D arriba y 4D abajo de la punta del pilote)

Para pilotes en arcillas saturadas en condiciones no drenadas ( $\varphi = 0$ ), se tienen la siguiente ecuación.

$$Q_p = N * c * cu * A_p = 9 * cu * A_p \quad (5.10)$$

Donde  $cu$  es la cohesión no drenada del suelo debajo de la punta del pilote

### 5.2.2 Método de Vesic para estimar $Q_p$

Este método se basa en la teoría de expansión de cavidades y en parámetros de esfuerzo efectivo para estimar la capacidad de carga por punta de un pilote. (Vesic, 1977)

$$Q_p = A_p (cN * c + \sigma'_o N * \sigma) \quad (5.11)$$

Donde  $\sigma'_o$  es el esfuerzo efectivo normal medio del terreno al nivel de la punta del pilote

$$\sigma'_o = \left( \frac{1+2K_o}{3} \right) q'_v \quad (5.12)$$

$K_o$  es el coeficiente de presión de tierra en reposo.

$$K_o = 1 - \text{sen}\varphi' \quad (5.13)$$

De acuerdo con la teoría de Vesic,

$$N * \sigma = f(I_{rr}) \quad (5.14)$$



Donde  $I_{rr}$  es el índice de rigidez reducida para el suelo.

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta} \quad (5.15)$$

Donde  $I_r$  es igual al índice de rigidez,  $E_s$  es el módulo de elasticidad del suelo,  $\mu_s$  es la relación de Poisson del suelo y  $\Delta$  es la deformación unitaria promedio en la zona plástica por debajo de la punta del pilote.

$$I_r = \frac{E_s}{2(1 + \mu_s)(c + q'_v \tan \varphi)} = \frac{E_s}{c + q'_v \tan \varphi} \quad (5.16)$$

Para condiciones sin cambio de volumen (arena densa o arcilla saturada),  $\Delta = 0$ , por consecuencia:

$$I_r = I_{rr} \quad (5.17)$$

Para  $\varphi = 0$  (condición no drenada), se tiene

$$N * c = \frac{4}{3} (\ln(I_{rr}) + 1) + \frac{\pi}{2} + 1 \quad (5.18)$$

Los valores de  $I_r$  se obtienen de pruebas de laboratorio para consolidación y triaxiales correspondientes a los niveles apropiados de esfuerzo. Sin embargo, para uso preliminar, se recomiendan los valores mostrados en la tabla 5.1.



**Tabla 5. 1:** Valores de índice de rigidez del suelo (Dass, 2001)

<i>Tipo de suelo</i>	<i>I<sub>r</sub></i>
Arena	70 - 150
Limos y Arcillas (condición drenada)	50 - 100
Arcillas (condición no drenada)	100 - 200

Baldi(1981), propone obtener *I<sub>r</sub>* en base a pruebas de penetración de cono como se muestra en la tabla 5.2:

**Tabla 5. 2:** *I<sub>r</sub>* en base a pruebas de penetración de cono Baldi(1981)

<i>I<sub>r</sub></i>	TIPO
$\frac{170}{F_{r\%}}$	Para penetración mecánica de cono
$\frac{300}{F_{r\%}}$	Para penetración eléctrica de cono

Donde *F<sub>r%</sub>* es la razón de fricción en prueba de cono donde *F<sub>c</sub>* es la resistencia a la fricción y *q<sub>c</sub>* es la resistencia de cono:

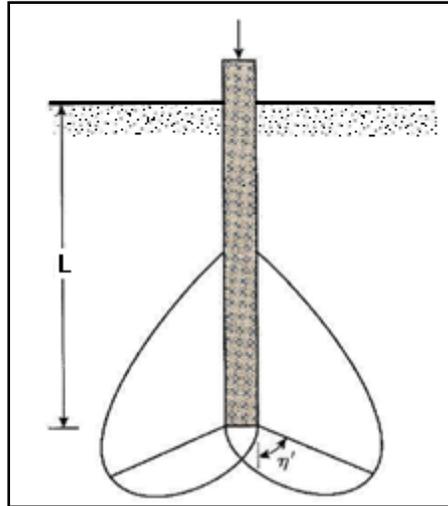
$$F_{r\%} = \frac{F_c}{q_c} * 100 \tag{5.19}$$

### 5.2.3 Método de Janbu para la estimación de *Q<sub>p</sub>*

Janbu (1976) propuso calcular *Q<sub>p</sub>* con la expresión

$$Q_p = A_p (cN * c + q'_v N * q) \tag{5.20}$$

En base a una superficie de falla como la que muestra a continuación:



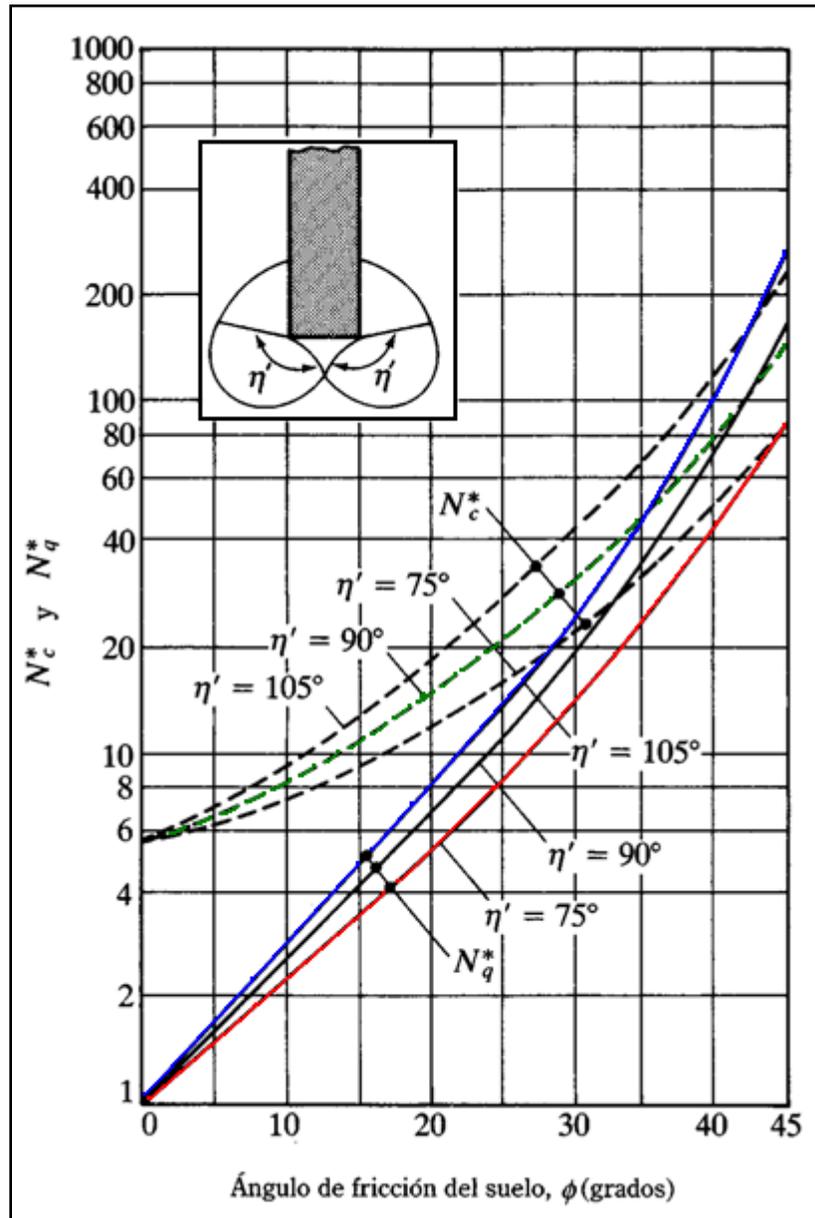
**Figura 5. 7:** Superficie de falla en la punta del pilote Jambu

Los factores de capacidad de carga  $N^*_c$  y  $N^*_q$  se calculan suponiendo una superficie de falla en el suelo en la punta del pilote similar a la mostrada en la figura 5.7. Las relaciones de capacidad de carga son entonces:

$$N^*_q = (\tan\varphi + \sqrt{1 + \tan^2\varphi})^2 (e^{2\eta'\tan\varphi}) \quad (5.21)$$

$$N^*_c = (N^*_q - 1)\cot\varphi \quad (5.22)$$

La figura 5.8 muestra la variación de  $N^*_c$  y  $N^*_q$  con  $\varphi$  y  $\eta'$ . El ángulo  $\eta'$  se muestra en la figura y varía de  $60^\circ$  en arcillas blandas a cerca de  $105^\circ$  en suelos arenosos densos. Para uso práctico, se recomienda que  $\eta$  varíe de  $60^\circ$  a  $90^\circ$ .



**Figura 5. 8:** Factores de Capacidad de apoyo de Jambu

También se tiene en la tabla 5.3 los factores de capacidad de carga de Janbu para  $\eta'$  igual a  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  y  $90^\circ$  con un  $\phi$  que tiene un rango de 0 hasta  $45^\circ$ .



**Tabla 5. 3:** Factores de capacidad de carga de Janbu.

$\phi'^{\circ}$	$\eta' = 60^{\circ}$		$\eta' = 75^{\circ}$		$\eta' = 90^{\circ}$	
	$N_c^*$	$N_q^*$	$N_c^*$	$N_q^*$	$N_c^*$	$N_q^*$
0	5.74	1.0	5.74	1.0	5.74	1.0
10	5.95	2.05	7.11	2.25	8.34	2.47
20	9.26	4.37	11.78	5.29	14.83	6.40
30	19.43	10.05	21.82	13.60	30.14	18.40
40	30.58	26.66	48.11	41.37	75.31	64.20
45	46.32	47.32	78.90	79.90	133.87	134.87

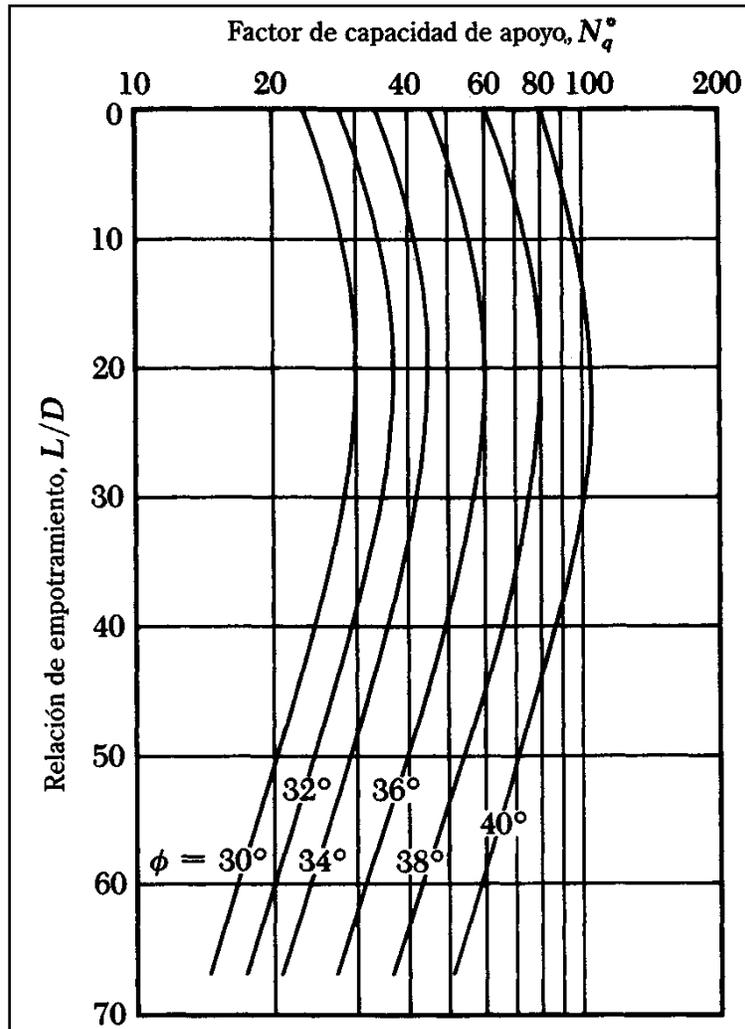
Independientemente del procedimiento teórico usado para calcular  $Q_p$ , su magnitud plena no se obtiene sino hasta que el pilote ha penetrado por lo menos entre 10% y 25% de su ancho. Esta profundidad es crítica en el caso de la arena.

### 5.2.4 Método de Coyle y Castello para estimar $Q_p$ en arenas

El método de Coyle y Castello (1981) se basa en el análisis de 24 pruebas de carga a gran escala en campo de pilotes hincados en arena. Con los resultados del análisis se sugiere que en arena la resistencia a punta se calcularía con la siguiente ecuación:

$$Q_p = A_p q'_v N^*_q \tag{5.23}$$

Donde  $q'_v$  = esfuerzo vertical efectivo en la punta del pilote y  $N^*_q$  es el factor de capacidad de carga; en la figura 5.9 se muestra la variación de  $N^*_q$  con respecto a  $L/D$  y el ángulo de fricción del suelo  $\phi$ .



**Figura 5. 9:** Variación de  $N^*_q$  con  $L/D$  (según Coyle y Castello, 1981)

### 5.2.5 Capacidad de Carga por punta de pilotes sobre roca

Para los pilotes hincados hasta un estrato subyacente de roca la resistencia unitaria última de punta en roca según Goodman, (1980) es aproximadamente:

$$q_p = q_u(N'_\phi + 1) \tag{5.24}$$



Donde  $N'_\varphi = \tan^2(45 + \varphi/2)$ ,  $q_u$  es la resistencia a la compresión no confinada de la roca y  $\varphi$  es el ángulo de fricción drenado.

Para la determinación de la resistencia a la compresión no confinada  $q_u$  se debe tener mucho cuidado ya que las muestras de laboratorio son de diámetro pequeño lo cual altera los resultados, considerado un efecto a escala, por esta razón se recomienda las siguiente ecuación:

$$q_{u(diseño)} = \frac{q_{u(tab)}}{5} \quad (5.25)$$

### 5.3 RESISTENCIA POR FRICCIÓN SUPERFICIAL $Q_s$

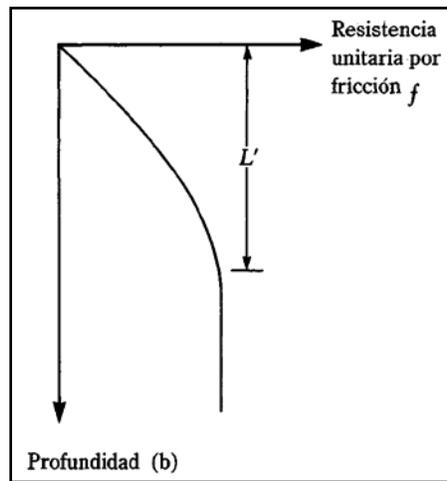
#### 5.3.1 Resistencia por fricción superficial $Q_s$ en Arena Dass.

La resistencia por fricción  $Q_s$ , es el producto de una resistencia unitaria última promedio  $f_{prom}$  por el área lateral del pilote  $A_s$  y si hay varios mantos es la sumatoria de varios mantos de diferente fricción como se muestra en la siguiente ecuación.

$$Q_s = \sum p \Delta L f_{prom} \quad (5.26)$$

En donde  $p$  es el perímetro de la sección del pilote,  $\Delta L$  es la longitud incremental del pilote sobre la cual  $p$  y  $f$  se consideran constantes y  $f$  la resistencia unitaria por fricción a cualquier profundidad  $z$ .

La resistencia unitaria por fricción,  $f$  es difícil de estimar. Al calcularlo se debe tomar en cuenta la naturaleza del lugar donde está ubicado el pilote ya que para pilotes hincados en arena, la vibración causada durante el hincado del pilote ayuda a densificar el suelo a su alrededor (Meyerhof, 1961).



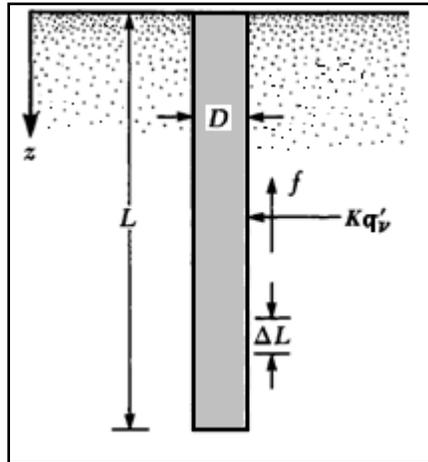
**Figura 5. 10:** Naturaleza de la variación de  $f$  en el campo

La variación en campo de  $f$  es aproximadamente como se muestra en la figura 5.11, la fricción unitaria superficial crece con la profundidad más o menos linealmente hasta una profundidad de  $L'$  y permanece luego constante. La magnitud de la profundidad crítica  $L'$  es de entre 15 y 20 diámetros del pilote; se asumirá:

$$L' \approx 15D$$

Los desplazamientos de los pilotes y los métodos que se utilizan en el momento de hincarlos o perforarlos también influyen en el cálculo de la fricción por ejemplo la fricción unitaria superficial en arena suelta es mayor para un pilote de alto desplazamiento que para un pilote de bajo desplazamiento, también los pilotes perforados o hincados parcialmente

con chorro de agua a gran presión, tendrán una fricción unitaria superficial menor que en el caso de pilotes hincados, tomando en cuenta que estos ejemplos anteriormente mencionados son realizados en profundidades similares.



**Figura 5.11:** Resistencia por fricción unitaria para pilotes en arena (Dass, 2001)

Considerando los factores anteriores y la figura 5.10 se tiene las siguientes relaciones:

$$\text{Para } z = 0 \text{ a } L' \quad f = Kq'_v \tan \delta \quad (5.27)$$

$$\text{Para } z = L' \text{ a } L \quad f = f_{z=L'} \quad (5.28)$$

Donde  $K$  es el coeficiente efectivo de la tierra,  $q'_v$  es el esfuerzo vertical efectivo a la profundidad bajo consideración y  $\delta$  es el ángulo de fricción entre suelo y pilotes

La magnitud de  $K$  varía con la profundidad y aproximadamente igual al coeficiente  $K_p$ , de presión pasiva de Rankine en la parte superior del pilote y menor que el coeficiente  $K_o$ , de la presión en reposo a una profundidad mayor. Los siguientes valores promedio de  $K$  son recomendados para usarse en las ecuaciones 5.27 y 5.28.



**Tabla 5. 4:** Ecuaciones de K para diferentes pilotes.

TIPO DE PILOTE	K
Perforado	$\approx K_o = 1 - \text{sen}\varphi$
Hincado, de bajo desplazamiento	$\approx K_o = 1 - \text{sen}\varphi$ a $1.4K_o = 1.4(1 - \text{sen}\varphi)$
Hincado, de alto desplazamiento	$\approx K_o = 1 - \text{sen}\varphi$ a $1.8K_o = 1.8(1 - \text{sen}\varphi)$

Los valores de  $\delta$  están aproximadamente en el rango de  $0.5\varphi$  a  $0.8\varphi$ . Para pilotes hincados de gran desplazamiento, Bhusan (1982) recomendó las siguientes ecuaciones, donde  $C_r$  es la compacidad relativa (%).

$$K \tan \delta = 0.18 + 0.0065 C_r \tag{5.29}$$

$$K = 0.5 + 0.008 C_r \tag{5.30}$$

Meyerhof (1976) indicó que la resistencia por fricción unitaria promedio  $f_{prom}$ , para pilotes hincados de gran desplazamiento se obtiene con los valores de la resistencia a la penetración estándar corregida promedio como:

$$f_{prom} \left( \frac{kN}{m^2} \right) = 2 \bar{N}_{cor} \tag{5.31}$$

Para pilotes hincados de desplazamiento pequeño:

$$f_{prom} \left( \frac{kN}{m^2} \right) = \bar{N}_{cor} \tag{5.32}$$

Donde  $\bar{N}_{cor}$  es el valor corregido promedio de la resistencia a la penetración estándar. La resistencia a la fricción sería calculada con la siguiente expresión:



$$Q_s = pL f_{prom} \quad (5.33)$$

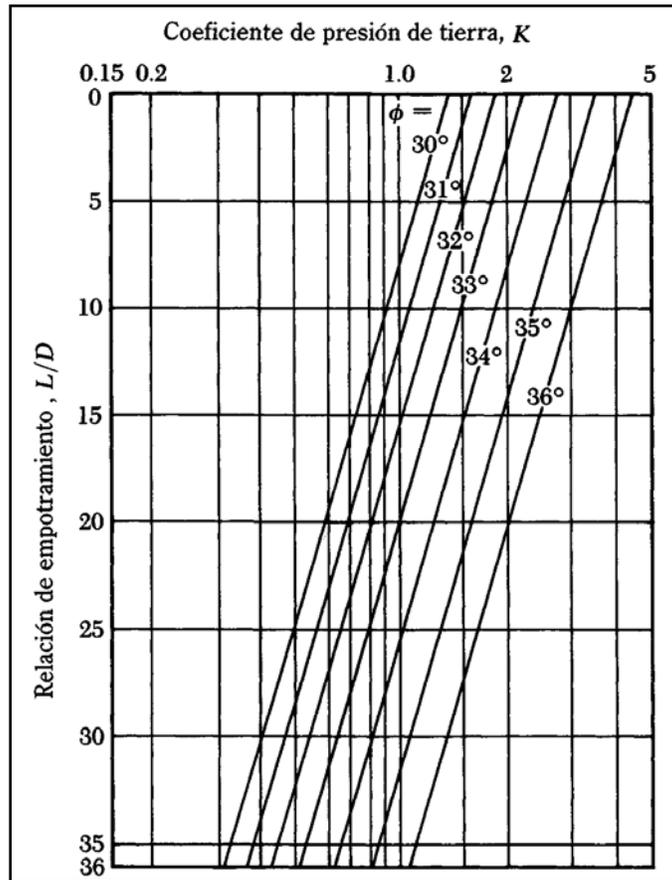
Coyle y Castello (1981) propusieron lo siguiente:

$$Q_s = pL f_{prom} = (K \bar{\sigma}'_v \tan \delta) pL \quad (5.34)$$

Donde  $\bar{\sigma}'_v$  es la presión de sobrecarga efectiva promedio y  $\delta$  es el ángulo de fricción entre suelo y pilote =  $0.8\varphi$ , tomando en cuenta lo anterior  $Q_s$  podría ser escrito de la siguiente manera:

$$Q_s = K \bar{\sigma}'_v \tan(0.8\varphi) pL \quad (5.35)$$

El coeficiente K de presión lateral de tierra, que fue determinado por observaciones de campo se muestra en la figura 5.12.



**Figura 5.12:** Variación de  $K$  con  $L/D$  (según Coyle y Castello, 1981).

### 5.3.2 Resistencia por fricción superficial $Q_s$ en Arcilla

La estimación de la resistencia a fricción en arcilla es casi tan difícil como en arena debido a la presencia de variables que no son cuantificables fácilmente. Los métodos empíricos  $\lambda$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  se describen a continuación:

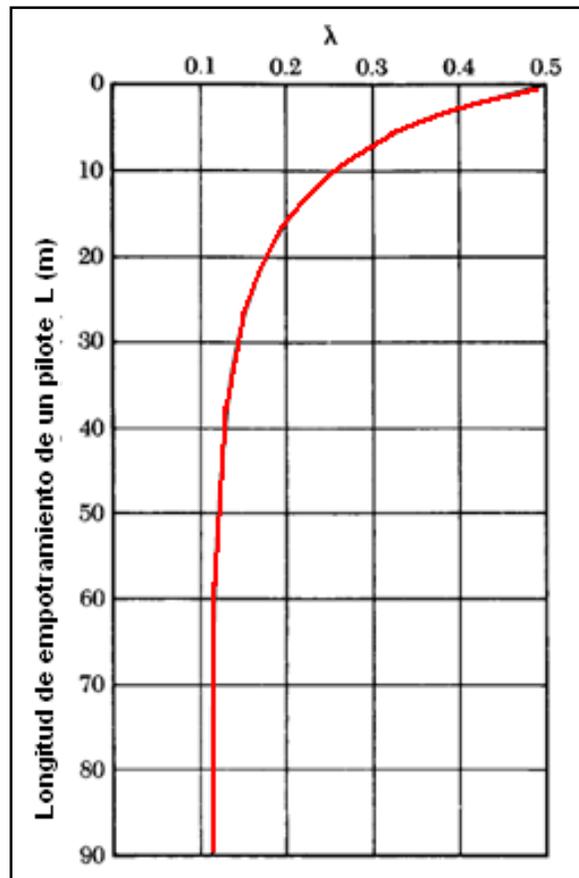
#### 5.3.2.1 Método $\lambda$

Este método fue propuesto por Vijayvergiya y Focht (1972). Se basa en la hipótesis de que el desplazamiento del suelo causado por el hincado del pilote conduce a una presión lateral pasiva a cualquier profundidad y que la resistencia unitaria superficial promedio es:

$$f_{su} = \lambda(\bar{\sigma}'_v + 2c_u) \tag{5.36}$$

En donde  $\bar{\sigma}'_v$  es el esfuerzo vertical efectivo medio para toda la longitud de empotramiento y  $c_u$  es la resistencia cortante media no drenada ( $\varphi = 0$ ).

Como se muestra en la figura 5.13 el valor de  $\lambda$  cambia con la profundidad de la penetración del pilote, reduciendo su valor cuando la profundidad aumenta.



**Figura 5.13:** Variación de  $\lambda$  con la longitud de empotramiento de un pilote (según McClelland, 1974).

La resistencia total por fricción entonces se calcula como en la ecuación 5.33 utilizando el  $f_{prom}$  calculado con el método  $\lambda$ . Se debe tener cuidado al obtener los valores  $\bar{\sigma}'_v$  y  $c_u$  en

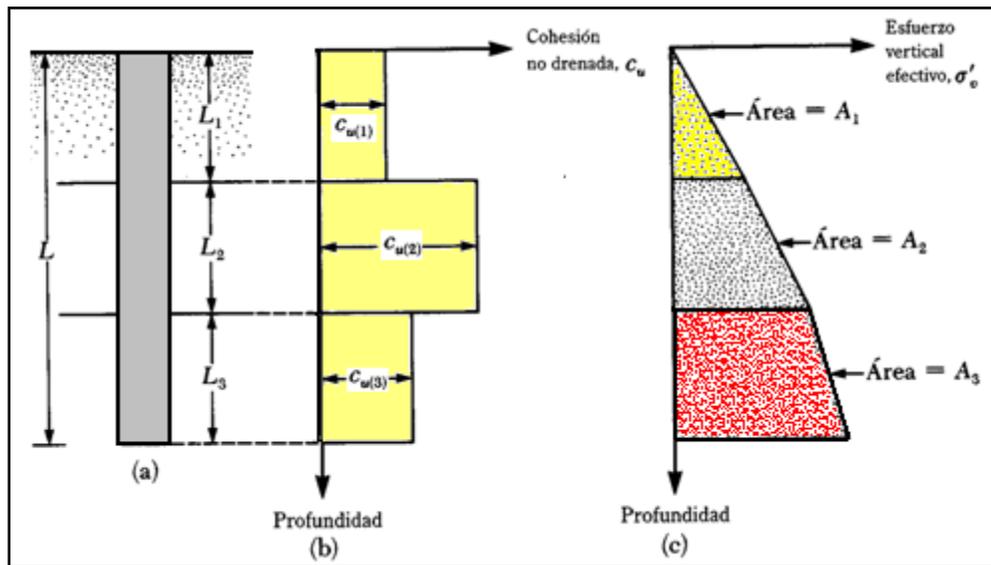
suelos no homogéneos (varios estratos), como se muestra en la figura 5.14b el valor medio de  $c_u$  es:

$$c_{u_{medio}} = c_{u(1)}L_1 + c_{u(2)}L_2 + \dots \quad (5.37)$$

Similarmente en la figura 5.14c se muestra la variación del esfuerzo efectivo con la profundidad, entonces el esfuerzo efectivo sería:

$$\bar{\sigma}'_v = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots}{L} \quad (5.38)$$

Donde  $A_1, A_2, A_3, \dots$  son áreas de los diagramas del esfuerzo vertical efectivo.



**Figura 5.14:** Aplicación del método  $\lambda$  en suelo estratificado (Dass, 2001)

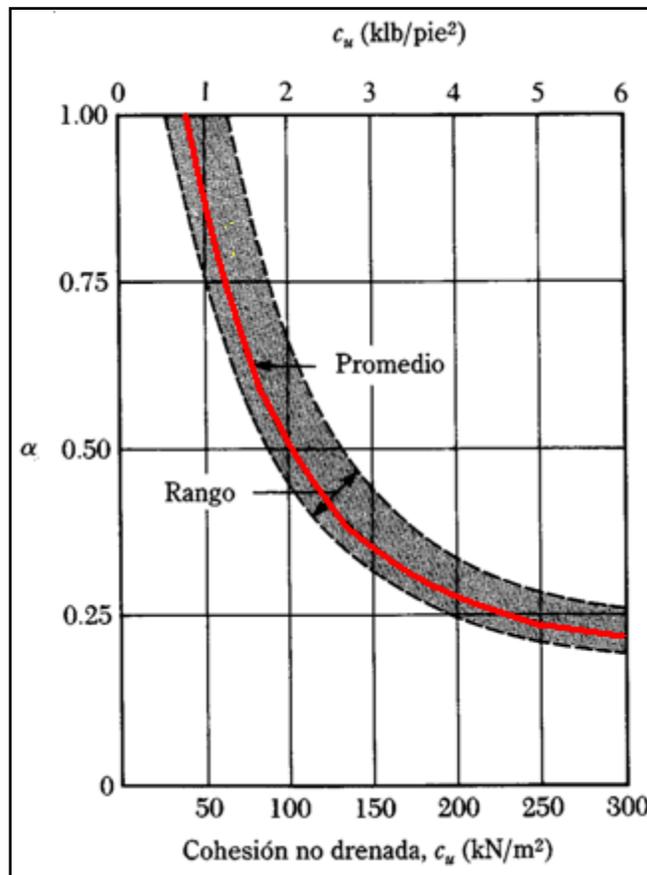
### 5.3.2.2 Método $\alpha$

La resistencia unitaria superficial en suelos arcillosos se representa por la ecuación:

$$f = \alpha c_u \tag{5.39}$$

Donde  $\alpha$  es un factor empírico de adhesión. La variación aproximada del valor de  $\alpha$  se muestra en la figura 5.15. Note que para arcillas normalmente consolidadas con  $c_u \leq$  aprox. 1 klb/pie<sup>2</sup> (50 kN/m<sup>2</sup>) y  $\alpha$  es igual a 1 según la figura 5.15, entonces  $Q_s$  es igual a:

$$Q_s = \sum(\alpha c_u p \Delta L) \tag{5.40}$$



**Figura 5.15:** Variación de  $\alpha$  con la cohesión no drenada de una arcilla. (Das, 2001).

Para resistencias más altas,  $\alpha$  varía ampliamente y, por consiguiente, conviene utilizar valores prudentes de diseño. El factor  $\alpha$  de adherencia tiene significado puramente



empírico, como magnitud que correlaciona los resultados de ensayos de carga a escala real con la resistencia al corte no drenada, donde se presume que el valor medido de  $c_u$  es el "verdadero"  $c_u$  en el terreno y que todos los fenómenos que ocurren durante construcción y carga pueden considerarse representados en su acción por una sola "constante". Por motivo de la incidencia determinante del método de instalación del pilote en el desarrollo de la adherencia, es necesario estudiar por separado las relaciones empíricas para los pilotes hincados con desplazamiento y para los pilotes perforados y fundidos in situ.

#### **5.3.2.2.1 Factor de adherencia en pilotes hincados con desplazamiento**

El hincado de pilotes en suelos cohesivos produce cambios radicales en la resistencia al corte; y fenómenos tales como alteración, levantamiento del terreno, formación de una abertura ensanchada y ablandamiento por deformación, inciden en la adherencia desarrollada entre el pilote y el suelo en contacto con el mismo. Con el paso del tiempo, se reconsolidan la arcilla vecina al pilote y la adherencia desarrollada depende, entonces, del tiempo transcurrido entre el hincado del pilote y la prueba de carga del mismo; varias experiencias indican que en un período del orden de 30 días hasta 90 días alcanza un valor razonable constante en las arcillas. (Simons et al., 1977).

La siguiente tabla 5.5 para  $\alpha$  por Sowers y Sowers (1970) es: ( $c_u$ , debe expresarse en kg/cm<sup>2</sup>):



**Tabla 5. 5: Valores de  $\alpha$  por Sowers y Sowers (1970)**

$\alpha$	$c_u$	OBSERVACIONES
0.9	$\leq 0.5kg/cm^2$	
$\frac{0.3}{c_u} + 0.294$	$> 0.5kg/cm^2$	
1 o aun mayor.	$< 0.5kg/cm^2$	Para arcillas blandas

Tomlinson (1957, 1970, 1971) han clarificado factores de adherencia en pilotes hincados en arcillas firmes, cuando se hincan pilotes en suelos cohesivos firmes a muy firmes, sin mantos superyacentes de suelos blandos o sueltos, se genera un levantamiento de la superficie del terreno alrededor del pilote; se desarrollan grietas radiales y el suelo se separa del pilote. Esta abertura, según Tomlinson (1957), incide decisivamente en reducir la fricción sobre la superficie lateral de pilotes en arcillas; él mismo conceptuó que ella se originaba en vibraciones laterales o efecto de "latigazo" durante el hincado.

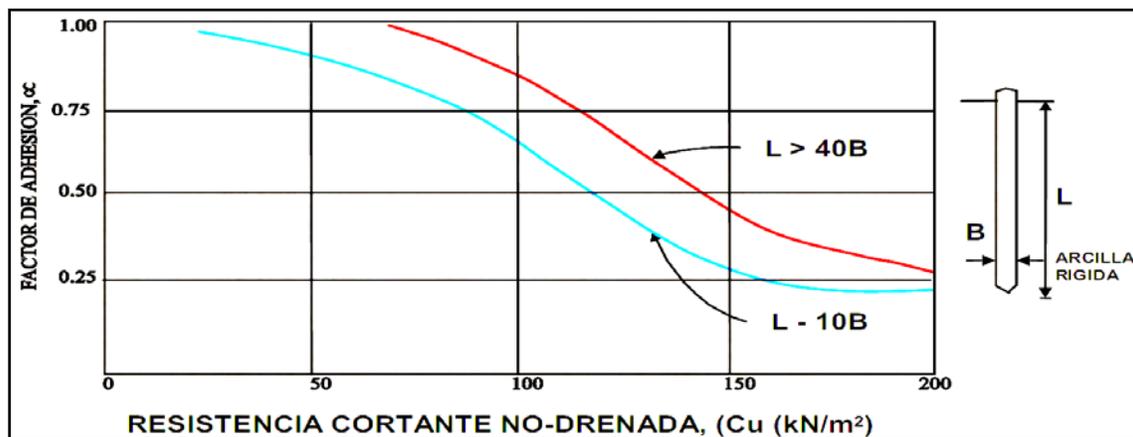
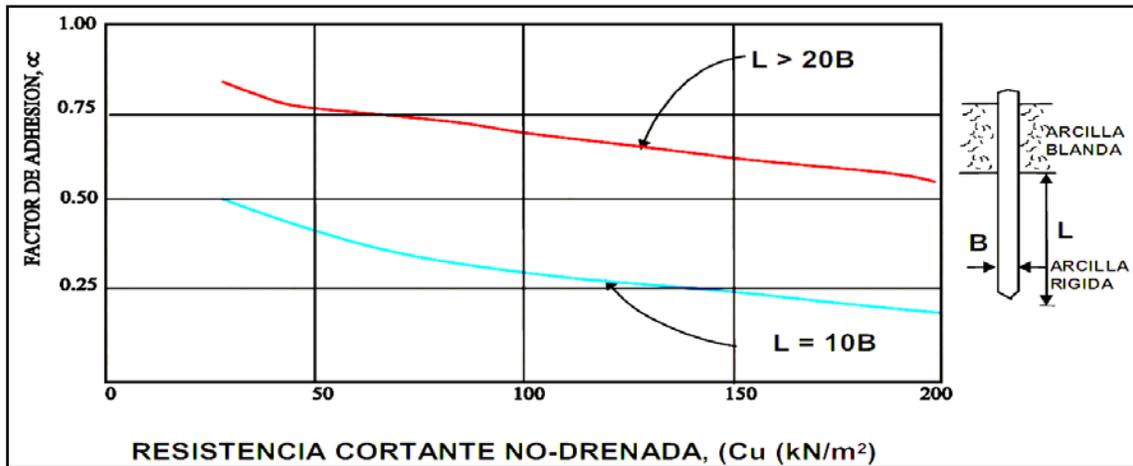
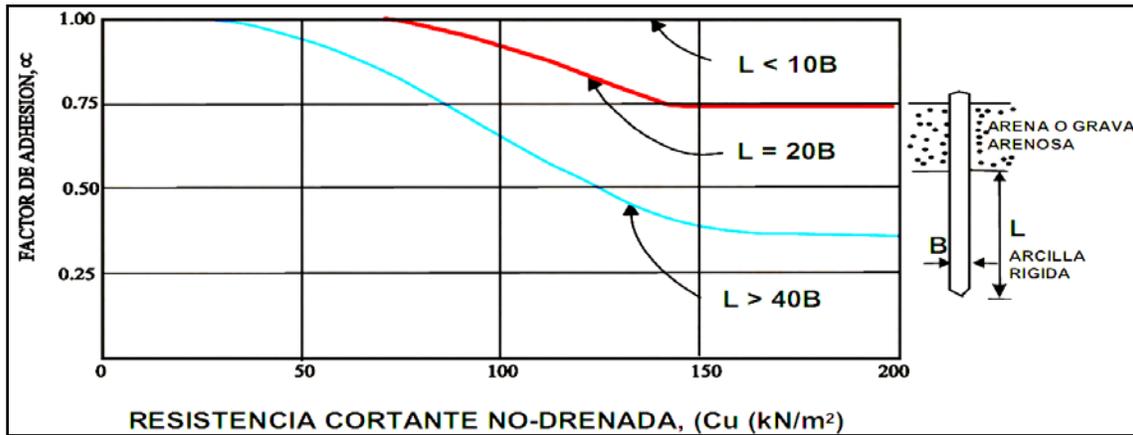


Figura 5.16: Curvas de diseño para el factor de adherencia de pilotes hincados en arcillas, según Tomlinson (1981).



En publicaciones de 1981 y 1986, Tomlinson presentó las curvas de la figura 5.16, señala que estas curvas son esencialmente aplicables a pilotes que soportan cargas ligeras a moderadas, hincados hasta penetraciones relativamente superficiales en el manto portante. En estas condiciones, los suelos superficiales que superyacen el manto portante inciden significativamente sobre la fricción en el fuste desarrollada a niveles inferiores. Para el caso 1 figura 5.16a se obtienen los mayores factores de adherencia por efecto del arrastre hacia abajo de material granular, que hace que prácticamente no haya pérdida de fricción.

Lo contrario es sucede en el caso 2 figura 5.16b arcilla blanda sobre arcilla muy firme en donde el arrastre de arcilla blanda tiene un efecto debilitante sobre la fricción. En el caso 3 figura 5.16c pilotes hincados en arcilla firme a muy firme sin estrato superyacentes diferente se forma una separación del suelo en la parte superior del pilote en donde no se desarrolla fricción. A menor penetración y mayor firmeza de la arcilla, mayor será la incidencia de dicha separación.

#### **5.3.2.2.2 Factor de adherencia en pilotes perforados y fundidos in situ**

La instalación de pilotes perforados por sistemas corrientes en la tecnología de construcción actual produce cambios en las propiedades del suelo, en las paredes de la cavidad para fundir el pilote, que inciden en forma determinante en la resistencia friccionante desarrollada en la interface suelo-pilote.

Después de colocar el concreto en la cavidad para el pilote, el agua migra hacia la arcilla desde el concreto sin fraguar. En mediciones en obra se han detectado incrementos en el contenido de humedad de suelo hasta del 8%, en espesores hasta de unos 8 cm (O'Neill y



Reese, 1972), debido a las acciones combinadas de la perforación y la colocación del concreto. Para involucrar la incidencia de varios aspectos de la instalación en la determinación del factor de adherencia, O'Neill y Reese (1972) usaron una ecuación de la siguiente forma:

$$\alpha_m = (\alpha_{11}\alpha_{12}\alpha_{13}) \alpha_2 \varphi \quad (5.41)$$

En donde:  $\alpha_m$  es un factor medio de adherencia a lo largo de todo el fuste;  $\alpha_{11}$  es la parte de  $\alpha_m$  asociada con la alteración del suelo durante la instalación;  $\alpha_{12}$  es la parte de  $\alpha_m$  asociada con la migración de agua del concreto y los efectos de base;  $\alpha_{13}$  es aquella parte de  $\alpha_m$  asociada con la retracción en la superficie;  $\alpha_2$  es un factor de adherencia, y  $\varphi$  es un factor que involucra el efecto del uso de lodos de perforación.

La principal utilidad de la ecuación 5.45 es la de servir como guía para orientar el análisis, puesto que no existen recomendaciones generales para los factores de la ecuación; éstos deben determinarse para cada sitio y para las condiciones particulares.

En un trabajo de investigación sobre arcilla de Beaumont, O'Neill y Reese adoptaron los siguientes valores para los factores de su ecuación Tabla 5.6:



**Tabla 5. 6:** Valores de índice de adherencia

	Valor	Observaciones
$\alpha_{11}$	0.65	Con pilote cilíndrico
$\alpha_{12} = \alpha_{13}$	$1 - \frac{0.762}{L}$	donde L, longitud del pilote, se expresa en m
$\alpha_2$	1	
$\varphi$	0.6	cuando se usa revestimiento y bentonita
	1	cuando se instala en una cavidad seca

Fleming, Randolph et al. (1985) señalan que, si puede suponerse que durante la construcción de los pilotes es pequeño el cambio en el estado de esfuerzos efectivos in situ, la fricción lateral para pilotes perforados se puede estimar como un 70% de la correspondiente a pilotes hincados con desplazamiento (según el análisis de expresiones aproximadas para la fricción verificadas con algunas mediciones in situ).

### 5.3.2.3 Método $\beta$

Cuando los pilotes se hincan en arcillas saturadas, la presión de poro en el suelo alrededor de los pilotes aumenta; este exceso de presión de poro en arcillas normalmente consolidadas es de 4 a 6 veces  $c_u$ . Sin embargo, en aproximadamente un mes, esta presión se disipa gradualmente. Por consiguiente, la resistencia unitaria por fricción en el pilote se determina con base en los parámetro de esfuerzo efectivo de la arcilla en un estado remoldeado ( $c=0$ ). Entonces, cualquier profundidad



$$f = \beta q'_v \tag{5.42}$$

Donde  $q'_v$  es el esfuerzo vertical efectivo a cualquier profundidad,

$$\beta = Ks \tan \varphi_R, \tag{5.43}$$

$\varphi_R$  ,es el ángulo de fricción drenado de la arcilla remodelada y  $Ks$  es el coeficiente de presión lateral de tierras. La magnitud de  $K$  es el coeficiente de presión de la tierra en reposo o como se muestra en la tabla 5.7 donde están las formulas para  $K$  y  $f$  en arcillas normalmente consolidadas y pre-consolidadas siendo  $OCR$  es la tasa de pre-consolidación.

**Tabla 5. 7:** Valores de índice de adherencia

K	f	TIPO
$(1 - \text{sen}\varphi_R)$	$(1 - \text{sen}\varphi_R)\tan\varphi_R q'_v$	para arcillas normalmente consolidadas
$(1 - \text{sen}\varphi_R)\sqrt{OCR}$	$(1 - \text{sen}\varphi_R)\tan\varphi_R\sqrt{OCR}q'_v$	para arcillas pre consolidadas

La resistencia total por fricción se calcularía sería igual a:

$$Q_s = \sum(f p\Delta L) \tag{5.44}$$

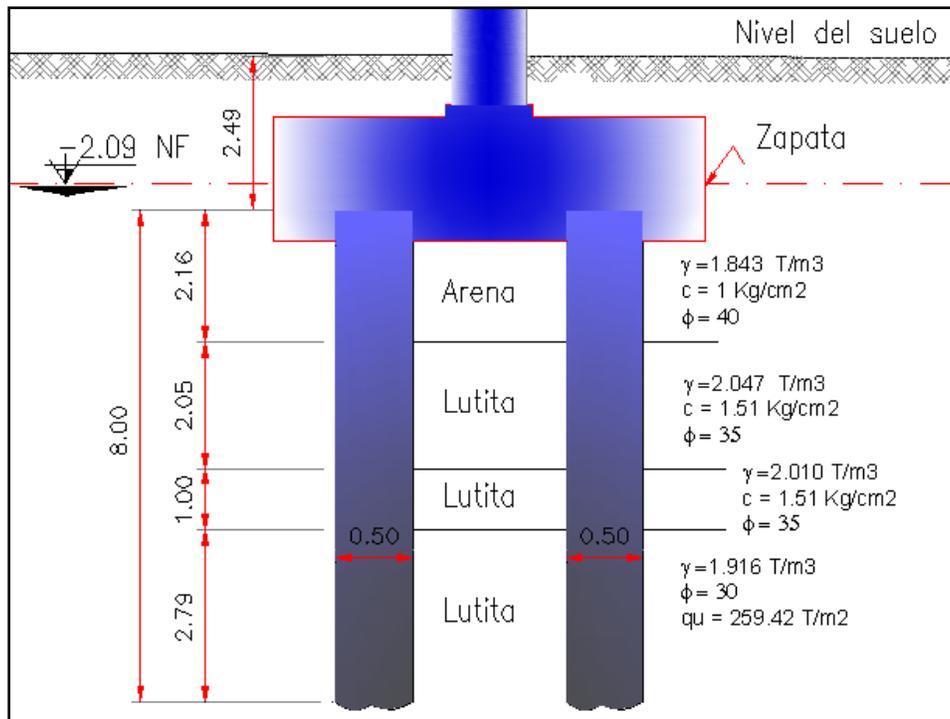
Para determinar la capacidad de carga segura por medio del análisis estático de carga última, se calcula la carga más alta que puede soportar un pilote aislado ( $Q_{adm}$ ), como la suma de la resistencia última por fricción lateral ( $Q_s$ ) y la resistencia última en la base ( $Q_b$ ), y se divide cada uno de los términos por un apropiado factor de seguridad ( $F_s$  y  $F_b$ ). Esta

relación se describe con la siguiente expresión, donde  $q_{bu}$  y  $f_{su}$  son las resistencias unitarias últimas de base y lateral (Woodward et al., 1972).

$$Q_{adm} = \frac{Q_b}{F_b} + \frac{Q_s}{F_s} \tag{5.45}$$

El factor de seguridad depende de los métodos utilizados en la construcción del pilote, de los parámetros de diseño, el criterio del diseñador entre otros.

### 5.4 APLICACIÓN CASO BAHÍA



**Figura 5.17:** Pila 5 del Acceso de Bahía de Caráquez.



Se utilizara los pilotes de la pila 6 que se encuentran en el acceso de bahía de Caráquez los cuales están especificados en el capítulo 1 y tienen una sección de 50 x 50, en la figura 5.17 se especifican los datos del suelo (Bonifaz, 2007); ya que el informe carece de resultados de la pruebas triaxiales se calculo a criterio los ángulos de fricción interna del suelo basándose en los otros datos del informe. También se toma en cuenta que la resistencia a la compresión de laboratorio ya ha sido previamente dividida por un factor de seguridad y está en condiciones de utilizarse directamente en el cálculo.

#### 5.4.1 Resistencia Unitaria Última de Punta $Q_p$ Caso Bahía de Caráquez

Se utilizara la resistencia a punta en rocas de Braja Das, la roca será una Lutita con un peso específico  $\gamma = 1.916 \text{ T/m}^3$ , un ángulo de fricción  $\phi = 30$  y una resistencia a la compresión  $q_u = 259.42 \text{ T/m}^2$  como se especifica en la figura 5.17 en el ultimo estrato.

$$N'_\phi = \tan^2(45 + \phi/2) \rightarrow N_\phi = \tan^2(45 + 30/2) \rightarrow N'_\phi = 3.00$$

$$q_p = q_u(N_\phi + 1) \rightarrow q_p = 259.42 \frac{\text{T}}{\text{m}^2} (3.00 + 1) \rightarrow q_p = 1037.68 \frac{\text{T}}{\text{m}^2}$$

$$Q_p = q_p A_p \rightarrow Q_p = 1037.68 \frac{\text{T}}{\text{m}^2} * 0.5 * 0.5 \rightarrow Q_p = 259.42 \text{ T}$$

$$Q_p = 259.42 \text{ T}$$



### 5.4.2 Resistencia por fricción superficial $Q_s$

Para el cálculo de la fricción se utilizara la formulas 5.27, también se utilizara la tabla 5.3 para la estimación de  $K$ , se ha tomado en cuenta que el desplazamiento es alto ya que el pilote es de concreto, tomando en cuenta que la profundidad es de 8 m el coeficiente activo de tierra  $K \approx 1.4K_o$  y el ángulo de fricción entre suelo y pilote se considera de  $\delta = 0.8\varphi$  para todos los estratos. La profundidad critica en este caso seria 8 metros como se muestra a continuación.

$$L' \approx 15D \rightarrow L' \approx 15 * 0.5 \rightarrow L' \approx 7.5 \rightarrow L' \approx 8$$

Se calculara la resistencia unitaria a la fricción de dos maneras primero para cada estrato y la segunda es calculándola para cada elemento finito, para estos dos cálculos se utilizara el mismo método de cálculo que es el siguiente:

$$\text{Para } z = 0 \text{ a } L' \qquad f = Kq'_v \tan\delta \qquad (5.46)$$

#### 5.4.2.1. Calculo de la resistencia unitaria a la fricción para cada estrato:

$$f_{z \rightarrow 0 - 2.16m}$$

$$\varphi = 40^\circ \quad \gamma = 1.843 \frac{T}{m^3} \text{ y } \Delta L = 2.16$$

$$K = 1.4(1 - \text{sen}\varphi) \rightarrow K = 1.4(1 - \text{sen}40) \rightarrow K = 0.50$$

$$q'_v = \gamma L \rightarrow q'_v = 1.843 \frac{T}{m^3} * 2.16m \rightarrow q'_v = 3.981 \frac{T}{m^2}$$



$$f_{z=2.16} = Kq'_v \tan \delta \rightarrow f_{z=2.16} = 0.5 * 3.981 \frac{T}{m^2} * \tan(0.8 * 40)$$

$$f_{z=2.16} = 1.244 \frac{T}{m^2}$$

$$f_{z \rightarrow 2.16-4.21m}$$

$$\varphi = 35^\circ \quad \gamma = 2.047 \frac{T}{m^3} \quad y \quad \Delta L = 2.05$$

$$K = 1.4(1 - \text{sen} \varphi) \rightarrow K = 1.4(1 - \text{sen} 35) \rightarrow K = 0.597$$

$$q'_v = \gamma L \rightarrow q'_v = 2.047 \frac{T}{m^3} * 2.05m \rightarrow q'_v = 4.196 \frac{T}{m^2}$$

$$f_{z=4.21} = Kq'_v \tan \delta \rightarrow f_{z=4.21} = 0.597 * 4.196 \frac{T}{m^2} * \tan(0.8 * 35)$$

$$f_{z=4.21} = 1.332 \frac{T}{m^2}$$

$$f_{z \rightarrow 4.21-5.21m}$$

$$\varphi = 35^\circ \quad \gamma = 2.010 \frac{T}{m^3} \quad y \quad \Delta L = 1.00$$

$$K = 1.4(1 - \text{sen} \varphi) \rightarrow K = 1.4(1 - \text{sen} 35) \rightarrow K = 0.597$$

$$q'_v = \gamma L \rightarrow q'_v = 2.010 \frac{T}{m^3} * 1.00m \rightarrow q'_v = 2.010 \frac{T}{m^2}$$

$$f_{z=5.21} = Kq'_v \tan \delta \rightarrow f_{z=5.21} = 0.597 * 2.010 \frac{T}{m^2} * \tan(0.8 * 35)$$



$$f_{z=5.21} = 0.638 \frac{T}{m^2}$$

$$f_{z \rightarrow 5.21-8.0m}$$

$$\varphi = 30^\circ \quad \gamma = 1.916 \frac{T}{m^3} \quad y \quad \Delta L = 2.79$$

$$K = 1.4(1 - \text{sen}\varphi) \rightarrow K = 1.4(1 - \text{sen}30) \rightarrow K = 0.70$$

$$q'_v = \gamma L \rightarrow q'_v = 1.916 \frac{T}{m^3} * 2.79m \rightarrow q'_v = 5.346 \frac{T}{m^2}$$

$$f_{z=8.00} = Kq'_v \tan\delta \rightarrow f_{z=8.00} = 0.70 * 5.346 \frac{T}{m^2} * \tan(0.8 * 30)$$

$$f_{z=8.00} = 1.667 \frac{T}{m^2}$$

**Tabla 5. 8:** Calculo de  $f$  total para cada estrato

Estrato	$\Delta L$ (m)	$f \frac{T}{m^2}$
1	2.16	1.244
2	2.05	1.332
3	1.00	0.638
3	2.79	1.667
$f_{TOTAL}$		4.88

#### 5.4.2.2. Calculo de la resistencia unitaria a la fricción para cada elemento finito:

En la tabla 5.8 se muestra el cálculo de las resistencias unitarias a fricción para cada elemento finito, tomando en cuenta que en los elementos finitos 3, 5 y 6 se encuentran dos estratos en cada uno de ellos. El método de cálculo ha sido el mismo utilizado en la sección



5.4.2.1 para el cálculo por estratos. En la siguiente tabla se muestra  $f$  total para cada elemento finito.

**Tabla 5. 9:** Calculo de  $f$  para cada elemento finito

<b>Estrato 1</b>		<b>K= 0.5</b>		
		<b><math>\phi</math></b>	<b><math>\gamma(T/m^3)</math></b>	<b><math>\Delta L</math> (m)</b>
		40	1.843	2.16
<b>Elemento</b>		<b><math>\Delta L</math></b>	<b><math>q'v</math></b>	<b>f</b>
<b>2.16 m</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	1.843	0.5758
	<b>2</b>	<b>1</b>	1.843	0.5758
	<b>3</b>	<b>0.16</b>	0.295	0.0921
<b>Estrato 2</b>		<b>K= 0.597</b>		
		<b><math>\phi</math></b>	<b><math>\gamma(T/m^3)</math></b>	<b><math>\Delta L</math> (m)</b>
		35	2.047	2.05
<b>Elemento</b>		<b><math>\Delta L</math></b>	<b><math>q'v</math></b>	<b>f</b>
<b>2.05 m</b>	<b>3</b>	<b>0.84</b>	1.71948	0.5458
	<b>4</b>	<b>1</b>	2.047	0.6498
	<b>5</b>	<b>0.21</b>	0.42987	0.1365
<b>Estrato 3</b>		<b>K= 0.597</b>		
		<b><math>\phi</math></b>	<b><math>\gamma(T/m^3)</math></b>	<b><math>\Delta L</math> (m)</b>
		35	2.01	1
<b>Elemento</b>		<b><math>\Delta L</math></b>	<b><math>q'v</math></b>	<b>f</b>
<b>1 m</b>	<b>5</b>	<b>0.79</b>	1.5879	0.5040
	<b>6</b>	<b>0.21</b>	0.4221	0.1340
<b>Estrato 4</b>		<b>K= 0.7</b>		
		<b><math>\phi</math></b>	<b><math>\gamma(T/m^3)</math></b>	<b><math>\Delta L</math> (m)</b>
		30	1.916	2.79
<b>Elemento</b>		<b><math>\Delta L</math></b>	<b><math>q'v</math></b>	<b>f</b>
<b>2.79 m</b>	<b>6</b>	<b>0.79</b>	1.514	0.4717
	<b>7</b>	<b>1</b>	1.916	0.5971
	<b>8</b>	<b>1</b>	1.916	0.5971



**Tabla 5. 10:**  $f$  Total para cada elemento finito

Elemento	$f \frac{T}{m^2}$
1	0.5758
2	0.5758
3	0.6379
4	0.6498
5	0.6405
6	0.6057
7	0.5971
8	0.5971
$f_{TOTAL}$	4.880

Para el cálculo de la fricción total se utiliza la sumatoria de  $f$  de todos los estratos o la sumatoria de  $f$  de todos los elementos finitos ya que es lo mismo, en este caso

$f_{TOTAL} = 4.880 \frac{T}{m^2}$ . El cálculo de  $Q_s$  se muestra a continuación:

$$Q_s = \sum p \Delta L f_{Total}$$

$$Q_s = [4 * 0.5m][8m] \left[ 4.88 \frac{T}{m^2} \right]$$

$$Q_s = 78.08 T$$

#### 5.4.3 Calculo de la Resistencia Última $Q_{adm}$ del pilote

Para determinar la capacidad admisible se ha considerado un factor de seguridad a punta y

a fuste  $F_b = F_s = 2$

$$Q_{adm} = \frac{Q_b}{F_b} + \frac{Q_s}{F_s}$$



$$Q_{adm} = \frac{259.42 T + 78.08 T}{2}$$

$$Q_{adm} = 168.75 T$$

Tomando en cuenta que la sobrecarga del pilote calculado en el capítulo 2 es igual a 166.46T tendríamos que:

$$Q_{adm} > Qd$$

Lo cual satisface el diseño actual.

## 5.5 Referencias

1. Bonifaz H, (2007). *Proyecto sondeos Bahia Area: Acceso al Terminal*, Laboratorio de ensayos de materiales. Escuela Politécnica del Ejército, 8 pag y Apéndice resultados pruebas de campo, ensayos de compresión simple, Quito, Ecuador.
2. Braja M. Das, (2001). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*, Editorial Thomson editores, Cuarta edición. 574, 581-601 pags, México.
3. Delgado V. Manuel, (2005), *Ingeniería de Fundaciones, Fundamentos e Introducción al Análisis Geotécnico*, Editorial Escuela colombiana de Ingeniería, Tercera edición, 432-434,452-465 Pags, Colombia.
4. Noboa J, Orozco L, Ron E, Silva G, (1980), *Cimentaciones Profundas*, Tesis de Grado, Universidad Central del Ecuador, 116-117 pags, Quito, Ecuador.