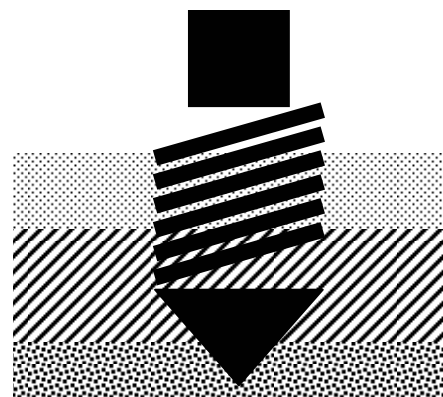


FUNDACIONES PROFUNDAS

2ª Parte

Prof.: Ing. Roberto Terzariol
2007



4.- ASENTAMIENTO EN FUNDACIONES PROFUNDAS.

Como se ha dicho, las deformaciones relativas para movilizar la resistencia friccional son del orden de 2 a 5 mm independiente de las dimensiones del pilote, mientras que para movilizar la resistencia de punta se requieren deformaciones de alrededor del 5-10% del diámetro del pilote. Por ello tanto la capacidad de carga como las deformaciones están influidas por el mecanismo de transferencia de cargas entre fricción y punta. En ese mecanismo inciden los métodos constructivos, el tipo de suelo o roca, las dimensiones del pilote, el entorno de cargas aplicado, etc.

Por otra parte el factor tiempo siempre debe ser tenido en cuenta ya que puede influir sensiblemente entre los asentamientos a corto y largo plazo, en especial en suelos saturados. En particular si se trata de rocas, suelos granulares secos o saturados o suelos cohesivos secos, los asentamientos instantáneos son los predominantes, mientras que si se trata de suelos cohesivos saturados los asentamientos a largo plazo, en especial si están vinculados a procesos de consolidación, son los preponderantes

Todo ello lleva a que las soluciones desarrolladas para estimar los asentamientos de pilotes tienen carácter empírico o semi-empírico y sus limitaciones deben tenerse en cuenta al efectuar los cálculos correspondientes.

4.1.- Cálculo de asentamientos por métodos determinísticos

Suelos: De acuerdo a Vesic (1977) el asentamiento en la cabeza de un pilote resulta de la suma de tres componentes:

$$S = s_1 + s_2 + s_3$$

Siendo:

S = asentamiento total

s_1 = asentamiento por deformación axial del fuste

s_2 = asentamiento producido por la parte de la carga tomada por la punta

s_3 = asentamiento producido por la parte de la carga tomada a lo largo del fuste

Si se admite que aún para cargas elevadas en términos de deformación del suelo, el material constitutivo del pilote se mantiene en un rango de proporcionalidad entre carga y deformación, la parte del asentamiento debido a la deformabilidad del fuste puede expresarse como:

$$s_1 = (Q_p + \alpha_s Q_s) \cdot \frac{L}{\Omega \cdot E_p}$$

En donde:

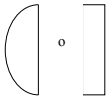


Q_p y Q_s = cargas reales transmitidas por punta y fricción

L = longitud del pilote

Ω = área del fuste

E_p = módulo elástico del material del pilote

α_s = coeficiente adimensional función de la distribución de carga entre fricción y punta.

Tipo de distribución				Pilote friccionales muy largos
α_s	0,5	0,33	0,67	0,1

Las componentes de punta y lateral pueden determinarse por dos caminos. Uno es considerar el suelo en que está inmerso el pilote como elástico e isótropo. En ese caso es determinante el módulo de deformación “ E_s ” y la relación de Poisson “ μ ”. Por integración de las soluciones elásticas de Midlin, se llega a expresiones como las siguientes:

$$s_2 = \frac{q_p \cdot D}{E_s} (1 - \mu^2) I_p \quad \text{y} \quad s_3 = \frac{f_{sm} \cdot D}{E_s} (1 - \mu^2) I_s$$

Siendo:

D = diámetro o lado del pilote

L = longitud del pilote

$q_p = (Q_p / \Omega_p)$ = carga unitaria neta en la punta del pilote

$f_{sm} = (Q_s / \pi \cdot D \cdot L)$ = carga unitaria media en el fuste del pilote

I_s, I_p = factores adimensionales de influencia, para situaciones ideales (Midlin)

Los resultados obtenidos con estas fórmulas están fuertemente influidos por la determinación de los parámetros intervinientes, lo que presenta incertidumbres para su valoración final.

Por su parte Vesic propone para estos asentamientos dos expresiones, derivadas de las anteriores, pero basadas en relaciones empíricas entre E_s y la resistencia de punta:

$$s_2 = \frac{C_p \cdot Q_p}{D \cdot q_{up}} \quad \text{y} \quad s_3 = \frac{C_s \cdot Q_s}{L \cdot q_{up}}$$

Donde:

Q_p, Q_s, L y $D \rightarrow$ idem a las fórmulas anteriores

q_{up} = capacidad de carga unitaria última en la punta $\rightarrow f(D, L, \text{tipo de pilote})$

C_p y C_s = coeficientes empíricos en función del suelo y tipo de pilote

$$C_s = \left(0,93 \cdot 0,16 \cdot \sqrt{\frac{L}{D}} \right) \cdot C_p$$

y C_p se obtiene de la tabla siguiente, para pilotes instalados en condiciones que el suelo bajo la punta se mantenga con la misma rigidez 10 diámetros en profundidad y el suelo subyacente sea de igual o mejor calidad.

Tipo de suelo	Pilote hincado	Pilote excavado
Arena (densa a suelta)	0,02 a 0,04	0,09 a 0,18
Arcilla (firme a blanda)	0,02 a 0,03	0,03 a 0,06
Limo (denso a suelto)	0,03 a 0,05	0,09 a 0,12

Para el caso de cilindros, pozos, pilote de gran diámetro, etc. o con ensanche inferior con esbeltez $L/D < 5$, el asentamiento está fuertemente influido por la base de apoyo. Así Burland (1985) plantea las siguientes ecuaciones empíricas basadas en los ensayos de penetración:

$$s_2 [mm] = 1,67 \cdot \frac{q_p (kPa) \cdot D_b^{0,7} (m)}{N_{60}^{1,4}} \rightarrow \text{para arenas norm. consolidadas}$$

$$s_2 [mm] = 0,556 \cdot \frac{q_p (kPa) \cdot D_b^{0,7} (m)}{N_{60}^{1,4}} \rightarrow \text{para arenas preconsolidadas}$$

A estos valores se les debe sumar el acortamiento elástico del pilote y $s_3 \sim 2mm$, que es el valor medio necesario para movilizar la resistencia friccional.

Rocas: Para el caso de pilotes o pilas apoyados en roca el asentamiento total en la cabeza también puede considerarse como la suma de los tres factores ya descritos:

$$w = w_b + w_p - \Delta w$$

$$w_b = \left[\frac{(\pi/2) \cdot q_p \cdot (1 - \nu^2) \cdot r}{E_r \cdot \lambda} \right], \quad w_p = q_{max} \cdot L / E_h \quad \text{y} \quad \Delta w = \left[\int_{L-L_1}^L (q_{max} - \sigma_y) d_y \right] / E_c$$

Si el pilote tiene la mayor parte de su longitud embebida en suelo el tercer término (Δw) puede despreciarse.

4.2.- Cálculo de asentamientos por métodos paso a paso

Coyle y Reese en el año 1966, propusieron una metodología paso a paso para determinar analíticamente la curva carga-asentamiento de un pilote sometido a carga axial de compresión. Esta metodología considera la resistencia friccional y la rigidez del suelo bajo la punta del pilote.

El método se basa en el supuesto que a medida que el pilote se asienta bajo la carga, el suelo lateral genera una resistencia cuya magnitud depende de las características tenso-deformacionales del mismo (Bowles, 1982).

Para ello se adopta una curva de deformación por corte del suelo normalizada donde se grafica la relación (ξ) entre la carga transferida y la resistencia al corte del suelo en función del desplazamiento (δ). En la figura 28 se muestra una curva simplificada pero suficientemente aproximada para resolver problema de este tipo:

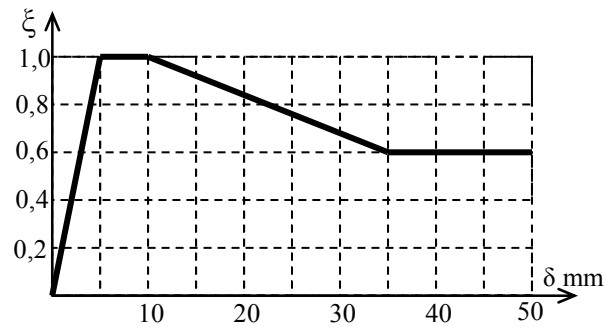


Figura 28

A su vez para la rigidez “ K_s ” del suelo bajo la base del pilote pueden adoptarse los siguientes valores (Swami Saran, 1996), de acuerdo al tipo de suelo y a su compacidad:

Suelos Granulares	Dens. Rel.	Suelta	Mediana	Densa
	N_{SPT}	< 10	10 - 30	> 30
K_s t/m ³ (suelo húmedo)		1500	4700	10.000
K_s KN/m ³ (suelo sumergido)		900	2900	10.000
Suelos Cohesivos	Consistencia	Firme	Muy firme	Dura
	N_{SPT}	10-20	20-30	> 30
q_u t/m ² (Comp. simple)		10,0-20,0	20,0-40,0	> 40,0
K_s t/m ³		2700	5400	10.800

Otra forma un poco más sofisticada es emplear las curvas propuestas por Lee y Salgado (1999) para determinar la carga actuante en la punta del pilote para distintas cargas y presiones de confinamiento, tal como se ve en la figura 29.

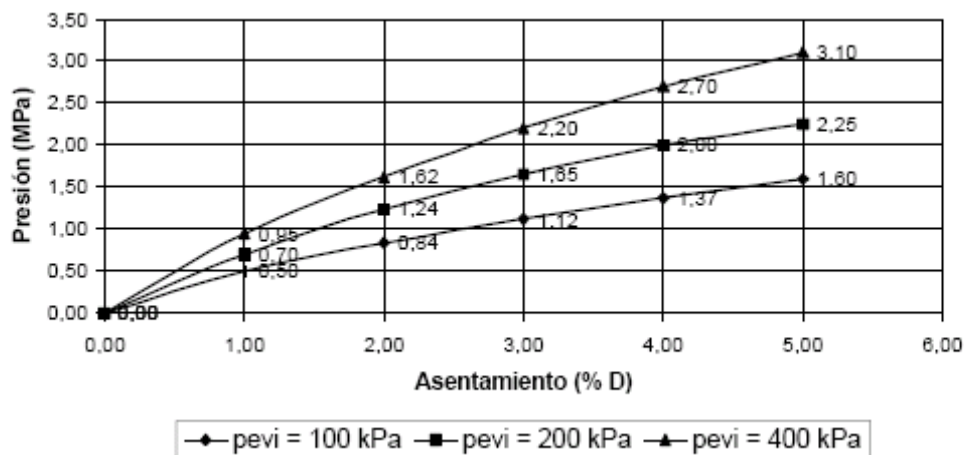


Figura 29

Cualquiera sea la forma de determinar la rigidez de la punta o fricción, el procedimiento puede sintetizarse como sigue:

1. Se divide el pilote en un determinado número de segmentos, por ejemplo 4 en la figura 30.

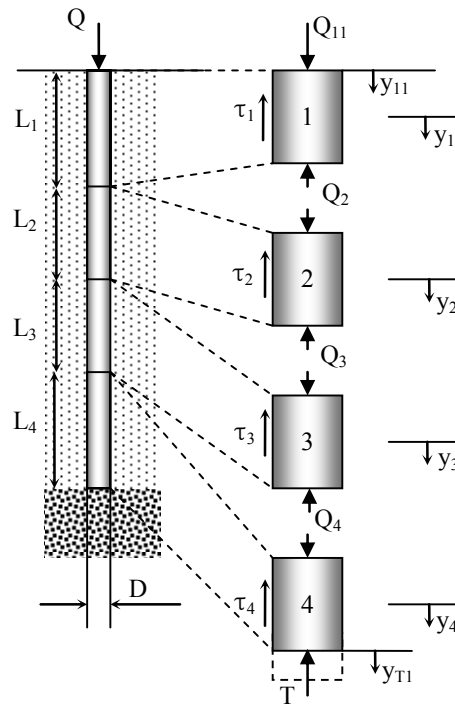


Figura 30

2. Se adopta un pequeño hundimiento de la punta y_{T1} .
3. Calcule la carga en la punta (T), correspondiente al hundimiento y_{T1} , empleando la siguiente ecuación:

$$T = \Omega_b \cdot K_s \cdot y_{T1}$$

Ω_b = área de la base

K_s = rigidez del suelo en la base (ver tabla)

y_{T1} = desplazamiento en la base

4. Estimar el movimiento y_4 del segmento siguiente. En el primer intento puede asumirse que $y_4 = y_{T1}$.
5. Con esta deformación (y_4) y el gráfico de la figura 28, obtener la relación "ξ" de transferencia de carga.
6. Calcular, mediante las fórmulas de capacidad de carga friccional o de resistencia al corte del suelo.
7. Empleando la relación "ξ" determinada en el punto 5 y la resistencia obtenida en el punto 6, calcule la tensión de transferencia de carga τ_4 en el segmento 4.
8. Con estos valores calcule la carga Q_4 en la parte superior del segmento.

$$Q_4 = T + \tau_4 \cdot L_4 \cdot \pi \cdot D$$

9. Calcule la deformación elástica en el punto medio del segmento como:

$$\text{Si } \frac{Q_4 + T}{2} \rightarrow \Delta y_4 = \frac{\left(\frac{Q_{med} + T}{2} \right) \left(\frac{L_4}{2} \right)}{\Omega_p \cdot E_p}$$

10. Calcule el nuevo movimiento del punto medio del segmento.

$$y_4 = \Delta y_4 + y_{T1}$$

11. Compare la deformación calculada en el punto anterior con el valor estimado en el punto 4.
12. Si la diferencia entre estos valores no está dentro de la tolerancia admitida, repita los pasos 3 a 11 y calcule un nuevo desplazamiento del punto medio, hasta que la convergencia sea aceptable.
13. Cuando esta convergencia sea aceptable pase al segmento siguiente y así sucesivamente hasta calcular el valor "Q₁₁" y "y₁₁" en la cabeza del pilote.
14. Este mismo procedimiento es seguido para diferentes valores de asentamiento en la base del pilote (y_{T2}, y_{T3}, ... y_{Tn}) calcule los pares de valores (Q₁₂-y₁₂), (Q₁₃-y₁₃), ..., etc. Con estos valores se puede graficar la curva carga deformación del pilote y con la carga de servicio se puede obtener la deformación del pilote, o bien para una deformación establecida determinar cual es la carga admisible del pilote.

Este método permite tomar en cuenta diversas condiciones del suelo y pilote. Puede fácilmente ser programado tomando en cuenta factores tales como estratos diferentes, variación de la resistencia con la profundidad, pilotes compuestos, efectos tixotrópicos, etc.

5.- ESFUERZOS PARASITOS. FRICCIÓN NEGATIVA. COLAPSO. EXPANSIÓN

Los esfuerzos parásitos en la interacción suelo-pilote dependen de las deformaciones relativas entre ambos. Para ello resulta de sumo interés como se transmiten recíprocamente las cargas laterales.

5.1.- Transferencia de cargas laterales en fundaciones profundas

Para comprender esta problemática resulta de interés analizar la figura 31. En la misma se ha graficado el resultado de un ensayo de carga sobre un pilote instrumentado con celdas de carga a diferente profundidad dentro del mismo.

Con estos dispositivos se puede conocer, a intervalos discretos, la fracción de la carga externa que llega a esa profundidad y por diferencia la parte de carga que es tomada por fricción en el tramo considerado.

$$\Delta Q_f = \Delta z \cdot \pi \cdot D \cdot q_f \rightarrow Q_{i+1} = Q_i - \Delta Q_f$$

Es decir que, a igualdad del largo de los segmentos y con diámetro constante del pilote, la pendiente de la curva resultante de graficar esa función, es la fricción unitaria "q_f".

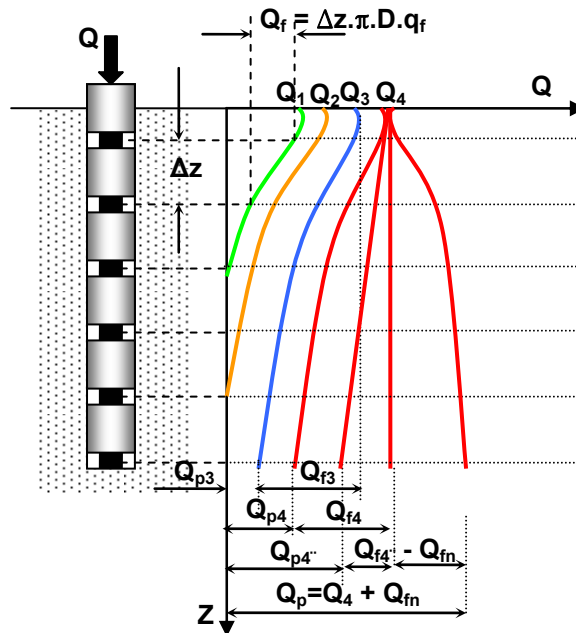


Figura 31

Si se aplica sobre el pilote una carga relativamente baja, Q_1 (curva verde), se puede apreciar que la carga es tomada en forma total por la fricción lateral, con una deformación menor que la máxima friccional, o sea:

$$Q_p = Q - \sum \Delta Q_f \approx 0 \rightarrow \delta \leq \delta_e + (2 - 5mm)$$

Lo mismo vale para la carga Q_2 (curva naranja), mayor que Q_1 , pero no tan grande como para afectar la punta del pilote.

Por el contrario si se aplica una carga Q_3 (curva azul), mayor que Q_2 y Q_1 , se aprecia que parte de la carga total llega a la punta del pilote. Esto se debe a que la carga aplicada ha superado la capacidad friccional de toda la longitud del pilote. Esta transferencia de carga, de acuerdo a lo analizado en el cálculo de asentamiento, produce una deformación en el suelo bajo la punta del pilote que será mayor cuanto menor sea la rigidez del mismo.

$$Q_{p3} = Q_3 - \sum \Delta q_f \rightarrow \delta_3 \cong \delta_e + (2 - 5mm) + \delta_{p3} \dots \delta_{p3} \approx \frac{Q_{p3}}{K_s}$$

Para una carga Q_4 mayor a las anteriores la cantidad de carga que llega a la punta es aún mayor y por lo tanto mayor será el asentamiento del pilote.

$$Q_{p4} > Q_{p3} \rightarrow \delta_4 > \delta_3$$

Si para este estado de carga (Q_4), se produce una disminución en la capacidad friccional parcialmente a lo largo del fuste, se produce un cambio de pendiente en la curva de transferencia de cargas lo que implica un aumento de asentamiento.

$$Q_{p4'} > Q_{p4} \rightarrow \delta_{4'} > \delta_4$$

Continuando con este razonamiento si la pérdida de fricción fuese total, toda la carga exterior Q_4 será absorbida por la punta del pilote con el consiguiente asentamiento.

Finalmente si el suelo que rodea al pilote fuese una arcilla que se consolida a lo largo del tiempo o por causa de una acción externa, fuese un limo loésico colapsable o bien se tratase de arenas finas licuables, se podría dar el caso que el suelo tuviera un asentamiento mayor que el del pilote y por lo tanto se produciría la recarga de la punta por fricción lateral negativa.

Todas estas situaciones provocan la transferencia de carga tomada por la fricción a la punta, y por ende incrementos de los asentamientos en el pilote.

Finalmente puede analizarse el caso de dos pilotes de igual diámetro y longitud inmersos en el mismo perfil de suelos. Uno de ellos es la fundación de una estructura con una carga baja, por ejemplo menor a Q_2 , y el otro funa un edificio de departamentos con una carga elevada, por ejemplo igual a Q_3 y se produce una disminución de la capacidad de carga lateral en el suelo que rodea ambos pilotes. En esta situación el pilote menos cargado debe transferir parte de su carga a la punta y sufrirá por lo tanto asentamientos adicionales mayores que el pilote más cargado que ya estaba transmitiendo parte de la carga a la punta. Por lo tanto los daños producidos en la estructura menos cargada serán superiores a los que registrará la estructura con más carga inicial.

5.2.- Acciones parásitas

Estas acciones son debidas a movimientos relativos entre pilote y el suelo que lo rodea.

Fricción negativa

Para evaluar el comportamiento relativo entre suelo y pilote y cuantificar los efectos de la fricción negativa se analizará la figura 32.

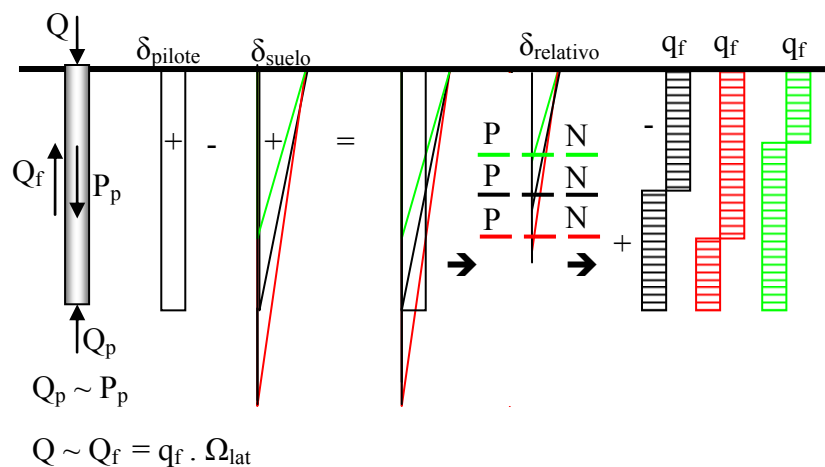


Figura 32

En esa figura se ha esquematizado un pilote inmerso en el suelo. Atendiendo a las consideraciones de compatibilidad entre deformaciones de fricción y punta y a las diferencias de áreas lateral y de base, en forma simplificada puede aceptarse que el peso propio del pilote se equilibre con la resistencia de punta, de modo que la carga externa sea tomada por la fricción lateral.

Se ha graficado también la deformación a lo largo del pilote asumiendo que en virtud de las diferencias entre los módulos elásticos del pilote y del suelo, la suma de los asentamientos por deformación lateral y por la punta del pilote son mucho más grandes que el acortamiento elástico del mismo. Por ello el diagrama es uniforme en toda su longitud.

Finalmente se han supuesto que el pilote está rodeado de un suelo que se asienta más que el pilote (consolidación, colapso, licuación, etc.) y tres alternativas de suelo de apoyo en la punta:

- 1º alternativa (color negro): se ha considerado el caso en que el pilote apoya sobre un suelo de compacidad media, por lo tanto el asentamiento del suelo lateral será máximo en la superficie y valdrá prácticamente cero en la base del pilote. En este caso la deformación relativa entre ambos supone una longitud en donde el suelo asienta más que el pilote y en el resto ocurre lo contrario. En esa situación, en la parte superior se producirá fricción negativa mientras que en la parte inferior la fricción será positiva. El plano que divide estas dos zonas se denomina Plano Neutro (PN) y de su profundidad dependerá el equilibrio de fuerzas. Es decir de ello dependerá que la fricción tome toda la carga externa o bien que parte de esa carga sea transmitida a la punta del pilote, con el consiguiente incremento de asentamiento.
- 2ª alternativa (color rojo): se avalúa el caso en que el pilote esta inmerso en un suelo homogéneo sin que exista un plano de apoyo definido, lo que se conoce como pilotes flotantes. Aquí las deformaciones del suelo circundante pueden extenderse por debajo de la base del pilote. Por ello el PN baja respecto de la 1ª alternativa y la zona con fricción positiva disminuye, requiriendo más deformación para que el suelo de punta colabore con la diferencia de carga.
- 3ª alternativa (color verde): esta alternativa representa el caso de pilotes que apoyan sobre un suelo muy firme o bien que penetran dentro de un manto de mayor rigidez. El PN sube respecto del las alternativa anteriores ya que la deformación del suelo lateral se anula por encima de la base del pilote con lo cual la zona con fricción positiva es mayor y equilibra con seguridad la carga exterior, sin necesidad de incrementos sustanciales de asentamientos en el pilote.

De este análisis pueden sacarse las siguientes conclusiones:

1. Salvo en el caso de pilotes flotantes aún cuando todo el estrato de suelo que rodea al pilote se deforme, la fricción negativa no se desarrollará en toda la longitud del pilote y quedará un tramo de pilote colaborante para tomar la carga exterior.

2. En el caso de pilotes flotantes o apoyados sobre suelos poco compactos, los asentamientos resultantes de la fricción negativa serán considerablemente superiores a las otras alternativas.
3. El plano neutro (PN) subirá relativamente en la medida que el suelo de apoyo sea más firme o bien cuando el pilote penetre dentro del manto resistente, con la consiguiente aumento de la zona de fricción positiva y la disminución de asentamientos totales.
4. A los efectos de contrarrestar la acción de la fricción negativa siempre resulta más conveniente para minimizar los problemas de asentamiento que los pilotes penetren dentro del manto resistente antes que aumentar el tamaño de la base.
5. Si se toman precauciones para minimizar la fricción negativa, como por ejemplo pintar el pilote con material bituminoso, emplear un forro metálico, etc., debe determinarse la posición del PN de modo tal de cortar esas medidas de protección en ese plano y no afectar la zona de fricción positiva.

Suelos colapsables

Los suelos colapsables son materiales que presentan una elevada rigidez en condición de bajo humedecimiento y que presentan una pérdida de la resistencia al corte, que puede provocar asentamientos importantes aún bajo la acción de su propio peso.

La experiencia muestra que aún estructuras fundadas sobre pilotes han sufrido daños de importancia al colapsar el suelo que las rodea. Esta problemática está asociada a problemas de disminución de capacidad friccional con la consiguiente transferencia de carga a la base del pilote y al fenómeno de fricción negativa por un colapso generalizado de estratos de suelo autocolapsable.

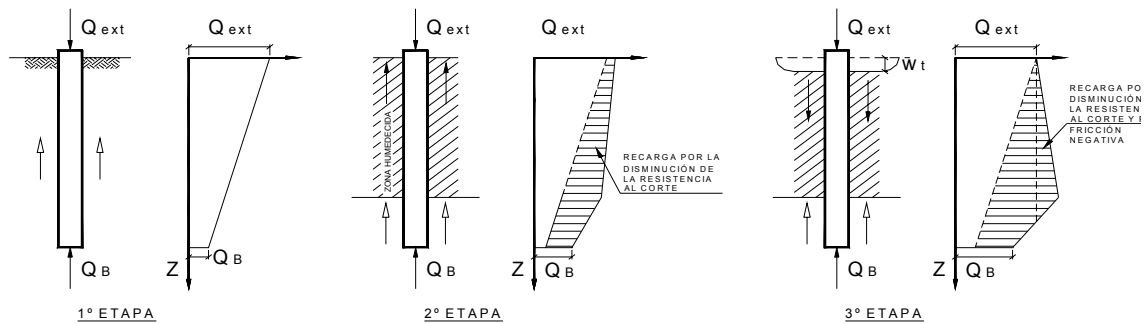
Es decir sería un caso de fricción negativa en la que el asentamiento del suelo circundante se produce por un humedecimiento del mismo por una acción externa como por ejemplo el ingreso de agua de lluvia, la pérdida de alguna cañería de agua o bien el ascenso del nivel freático.

El análisis es diferente ya sea en los dos primeros casos, en los que el humedecimiento se produce de arriba hacia abajo, frente al tercero en que el humedecimiento se produce de abajo hacia arriba.

En el supuesto que el humedecimiento se produzca de arriba hacia abajo la historia más probable de un pilote inmerso en suelo colapsable se muestra en la figura 33 (Redolfi y Oteo, 1992).

En la misma se aprecia que al humedecerse el suelo alrededor del pilote disminuye la capacidad friccional y la carga exterior comienza a transmitirse a la parte inferior del pilote. Esta transferencia de carga está asociada a una deformación del suelo subyacente y un asentamiento en el pilote. Si el humedecimiento se generaliza y el suelo autocolapsa esa variación de

deformaciones relativas genera una recarga en el pilote con el correspondiente aumento de los asentamientos.



Etapas de carga de un pilote en Suelos Colapsables

Figura 33

En la 1ª Etapa, el suelo está seco y prácticamente toda la carga exterior es tomada por la fricción lateral y la base toma sólo el peso propio. Cuando el suelo se humedece lateralmente, en un espesor menor a la longitud del pilote, se pierde capacidad friccional y parte de la carga es transmitida a la punta incrementando los asentamientos. Finalmente en la 3ª etapa el suelo ha colapsado y por ende se ha deformado más que el pilote, produciendo fricción negativa en la parte superior por encima del Plano Neutro.

En la tercer etapa aumenta la carga en la base y el asentamiento total del pilote. Para mantener el criterio de minimizar los asentamientos es necesario diseñar estos pilotes de modo que tomen prácticamente toda su carga por fricción penetrando dentro de mantos estables inferiores antes que aumentar el área de apoyo en la base. Esta solución no siempre es sencilla ya que muchas veces es dificultoso excavar dentro de mantos arenosos muy gruesos o suelos cementados, pero en estos casos la gran rigidez de estos materiales eleva la posición del plano neutro delimitando una zona de fricción positiva aún dentro del manto potencialmente colapsable.

Las ecuaciones de diseño resultan ser las siguientes:

$$Q_{ext} + Q_{FU.1} = Q_{FU.2} \quad \rightarrow \quad Q_{ext} + \pi \cdot D_f \cdot H \cdot \tau_{m\acute{a}x.1} = \pi \cdot D_f \cdot (L - H) \cdot \tau_{m\acute{a}x.2}$$

Donde

$$\varepsilon = \frac{\tau_{m\acute{a}x.1}}{\tau_{m\acute{a}x.2}}$$

Por lo tanto la longitud que garantiza que se absorban los esfuerzos externos con mínimas deformaciones adicionales es:

$$L = (1 + \varepsilon) \cdot H + \frac{Q_{ext}}{\pi \cdot D_f \cdot \tau_{m\acute{a}x.2}}$$

La alternativa de un ascenso del nivel freático y que por tal motivo el suelo colapse ha sido presentada por Redolfi (2006). En dicho artículo se analizan mediante ejemplos concretos diversas alternativas resultando la más útil la que

se refiere al ascenso del nivel freático con disminución de la resistencia al corte y colapso del suelo circundante. De estos análisis puede determinarse la diferencia entre un humedecimiento descendente y uno ascendente en el asentamiento del pilote para diversas longitudes (figura 34), siendo notablemente superior el segundo y apreciándose una notable disminución a medida que el pilote es más largo.

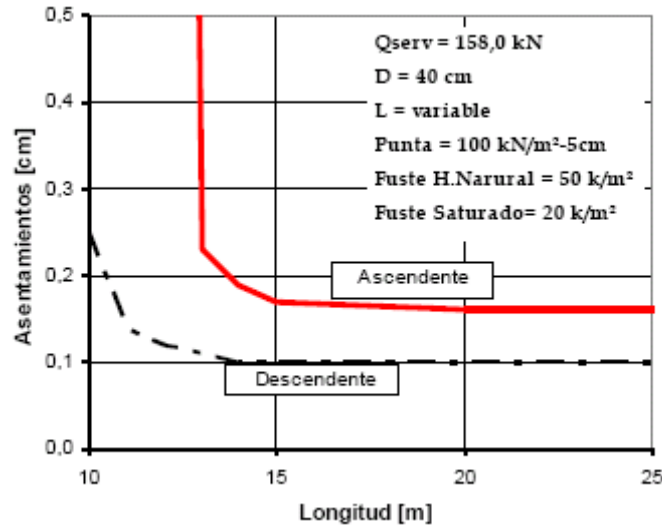


Figura 34

Resulta también de interés la influencia de la rigidez de la base en el asentamiento total resultando muy importante la disminución a medida que el suelo de apoyo es más rígido. Es decir validando la hipótesis de la elevación del plano neutro. En la figura 35 Se observan los resultados, para un pilote de ejemplo.

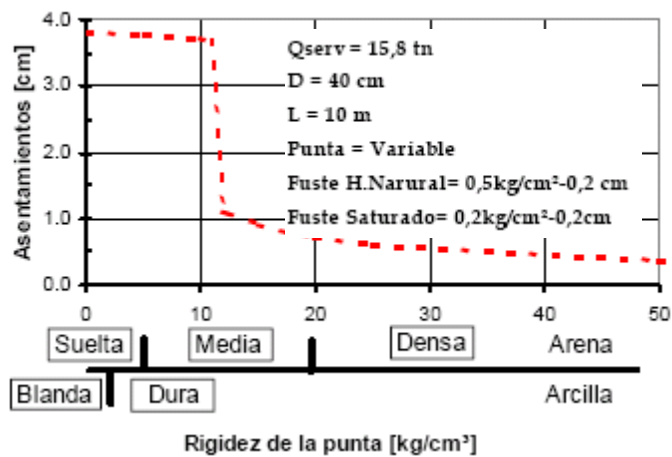


Figura 35

Finalmente la figura 36 muestra como disminuye el asentamiento total de un pilote inmerso en suelo colapsable cuando la longitud aumenta de 10 a 13 metros mientras se produce una subida del nivel freático.

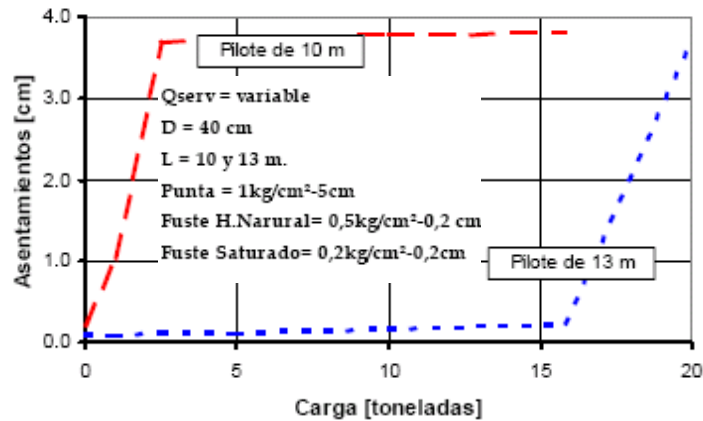


Figura 36

Con estos análisis Redolfi, propone para el diseño de pilotes en suelos colapsables cuando asciende el nivel freático, una ecuación similar a la empleada para el humedecimiento descendente pero cambiando la relación de tensiones de corte por la relación entre tensión no saturada y tensión saturada.

$$\tilde{Q}_{Ultima} = [L - (1 + \varepsilon_A)H] \cdot \pi \cdot D_f \cdot \tau_{m\acute{a}x.sat.2} - P_p$$

Donde:

$$\varepsilon_A = \frac{\tau_{m\acute{a}x.nat.1}}{\tau_{m\acute{a}x.sat.2}}$$

Suelos expansivos

Los suelos expansivos plantean en principio una situación inversa a las estudiadas en los puntos anteriores ya que la deformación del suelo se opone a la del pilote con lo que se garantizaría que no hay aumento de los asentamientos totales. Si bien este análisis es cierto existe el problema que esta deformación relativa entre pilote y suelo produce esfuerzos ascendentes que pueden superar la carga externa generando tracción en el pilote.

En general este tipo de suelos sólo se expanden en la zona denominada activa, que se encuentra en los primeros metros de suelo que es donde se producen los cambios de humedad y donde es menor la tapada permitiendo su hinchamiento.

Pero también pueden darse casos de profundidades intermedias donde existan lentes de este material bajo una cubierta de poco espesor de suelo no expansivo. En este caso al expandirse el lente intermedio levantará el suelo superior el que también ejercerá fricción sobre el pilote.

En la figura 37 se esquematizan las deformaciones relativas entre pilote y suelo expansivo y se analiza su interacción para determinar los esfuerzos actuantes.

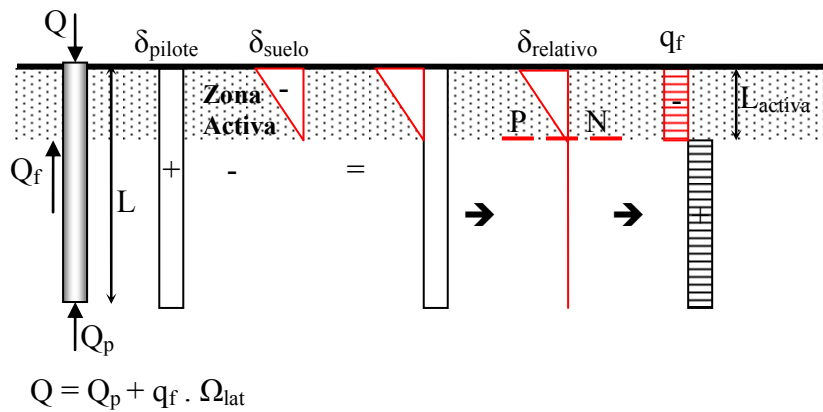


Figura 37

El pilote ya está cargado y tiene una deformación “ δ ”, al expandirse el suelo en la zona activa se produce una deformación relativa de sentido contrario. En este caso la diferencia de deformaciones resulta en una deformación diferencial de toda la zona activa que genera una fricción en sentido ascendente. Es decir el plano neutro coincide con la “zona activa”. Este esfuerzo ascendente genera por reacción a la fricción de la zona inferior como una “tracción” y deberá verificarse el pilote para que resista este esfuerzo.

En realidad sólo se producirán esfuerzos de tracción si se supera la carga externa. Para cualquier otra situación sólo se producirá una “descompresión” del pilote.

$$Q_{tracc} = \pi \cdot D \cdot q_f \cdot L_{activa} - Q$$

En el otro extremo la carga de tracción nunca puede ser mayor que la resistencia friccional del manto inferior.

$$Q_{tracc} \leq \pi \cdot D \cdot q_f \cdot (L - L_{activa})$$

Por lo tanto para un suelo arcilloso homogéneo, es decir que q_f es el mismo en la zona activa y la no activa, la carga de tracción esta limitada por la longitud no activa, siempre que:

$$L_{activa} \geq \frac{(L - L_{activa})}{2}$$

Merece un párrafo aparte el caso de pilotes traccionados sujetos al esfuerzo de fricción por expansión del suelo. En este caso ambos esfuerzos de tracción no se suman. Esto puede comprenderse si se analiza la analogía mecánica planteada en la figura 38

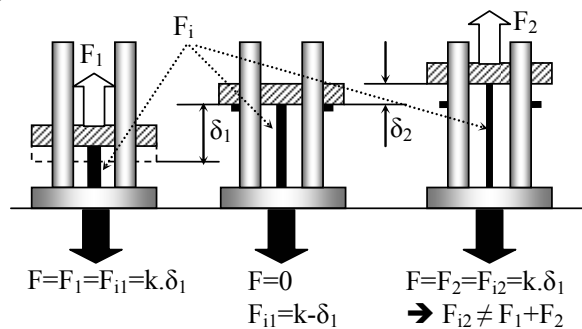


Figura 38

Si tenemos un dispositivo como el indicado con un resorte elástico interior cuya rigidez es “k” y lo sometemos a una fuerza de tracción F_1 el resorte se estirará hasta alcanzar una deformación δ_1 tal que el esfuerzo interior del resorte equilibre la acción exterior ($F_{i1} = k \cdot \delta_1$). En ese punto anclamos el dispositivo en la nueva posición del plato superior. En esta situación la carga externa es nula y la tracción interna se equilibra con la compresión en las columnas.

A partir de esta nueva posición se la aplica una nueva carga F_2 , mientras esta carga sea inferior a F_1 , el resorte no se desplazará y la fuerza interna seguirá siendo F_{i1} . Recién cuando F_2 supere a F_1 el resorte volverá a estirarse y por equilibrio de fuerzas verticales la fuerza interna será cuanto más igual a F_2 , pero nunca igual a $F_1 + F_2$. Por lo tanto las acciones sobre el resorte no se suman.

Esto es análogo lo que ocurre en un pilote sometido a tracción que en un determinado momento de su vida útil sufre un fricción lateral por expansión del suelo circundante.

6.- GRUPOS DE PILOTES Y PILOTES TRACCIONADOS

6.1.- Grupo de pilotes

Capacidad de carga

Los grupos de pilotes se ejecutan cuando debido a la carga de la columna se requiere más de un pilote para soportarla.

La capacidad del grupo no siempre es igual a la suma de las capacidades individuales de cada pilote. Esto se debe a un problema de deformación relativa como ya se ha indicado. En la figura 39 se aprecian dos plantas de grupos de 4 pilotes cada una con diferentes separaciones entre ejes de pilotes.

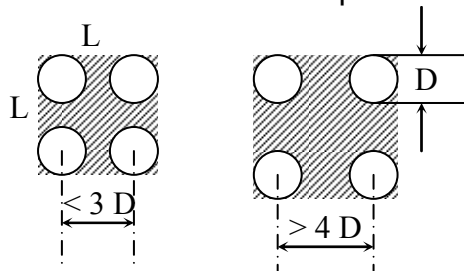


Figura 39

En el primer caso al aplicar carga sobre los pilotes los mismos se hundirán en el suelo, pero el suelo confinado entre los pilotes se desplazará junto con ellos, es decir que no habrá desplazamiento relativo, por lo tanto no habrá fricción a lo largo de toda la superficie de los pilotes sino sólo a lo largo de los lados “L”. Por superficie específica se sabe que $4 \times \pi \times D \gg 4 \times L$, por lo tanto el aporte friccional será menor que la suma de las fricciones individuales de los pilotes.

Por su parte la base del grupo será $L \times L$ y es superior a $4 \times \Omega_{pil}$, pero la deformación necesaria para desarrollar la carga por la base será mayor es

decir la rigidez será menor como se desprende de la figura 39. Es decir que la colaboración de la punta será menor que la suma de las capacidades de los cuatro pilotes individuales.

Por su parte en la segunda disposición, la separación de los pilotes es tal que el suelo interior permanece en su posición cuando se desplazan los pilotes generando un desplazamiento relativo y por lo tanto permite la generación de resistencia friccional a lo largo de los fustes y la capacidad de carga por la punta no se ve influida. En esta configuración la capacidad de carga del grupo es igual a la suma de las capacidades de carga individuales. En general el límite aceptado para no considerar el efecto de grupo, es una separación entre ejes de pilotes de entre 3 y 4 diámetros.

Por su parte si los pilotes son hincados en arena el suelo se compacta por la vibración de la hinca y aumenta su capacidad de carga, mientras que si son excavados se desconfinan el suelo perdiendo carga el grupo. Para el caso de arcillas siempre existe una disminución de carga, pero si los pilotes apoyan sobre roca con una separación de más de $1,5 \times D$ no se aplica ninguna reducción.

Las fórmulas más comunes para estimar la capacidad de carga de un grupo de pilotes con una separación entre ejes " $s < 3xD$ " son las siguientes:

Pilotes hincados en arena $\rightarrow Q_{grupo} = \Sigma Q_{indiv.}$

Pilotes excavados en arena $\rightarrow Q_{grupo} = 0,7 \cdot \Sigma Q_{indiv.}$

Pilotes en arcilla $\rightarrow Q_{grupo} = \eta \cdot \Sigma Q_{indiv.}$

Siendo

$$\eta = 1 - \frac{\arctg(s/D)}{\pi} \cdot \frac{[m(n-1) + n(m-1) + \sqrt{2}(m-1)(n-1)]}{m \cdot n}$$

$m = n^\circ$ de pilotes por fila y $n = n^\circ$ de pilotes por columna

Asentamiento de grupo de pilotes

Para los grupos de pilotes se recurre a sustituir el pilotaje por una "zapata equivalente" cuyos asentamientos se calculan por los métodos estudiados para fundaciones superficiales (elásticos, edométricos, Schmertmann, etc.).

Existen al menos dos criterios para ubicar el apoyo de dicha zapata (figura 40).

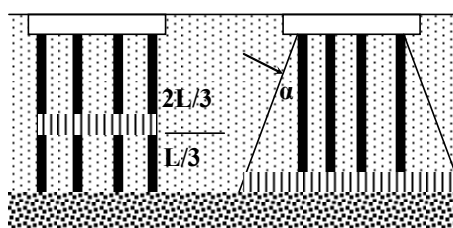


Figura 40

En el primero (Terzaghi), la zapata se encuentra a una profundidad de 0,66 de la longitud del pilotaje, con el área equivalente igual a la superficie envolvente de la planta del grupo de pilotes.

En el segundo la zapata puede suponerse ubicada en el plano de apoyo de los pilotes, pero con un área de apoyo que resulta de suponer una distribución según un ángulo “α”. En la tabla siguiente se indican algunos valores de “α”.

Tipo de suelo	α
Arcilla blanda	10°
Arcilla compacta	20°
Arenas	30°

Distribución de cargas en el grupo de pilotes

Para analizar la distribución de cargas es necesario considerar que el cabezal es un elemento suficientemente rígido de modo de transmitir las cargas en forma proporcional a la rigidez de cada uno de los pilotes.

Para las cargas verticales puede aceptarse que:

$$P_i = \frac{P}{n}$$

Cuando existen además de las cargas verticales momentos de vuelco como se indican en la figura 41, la distribución se realiza aplicando el teorema de Steiner.

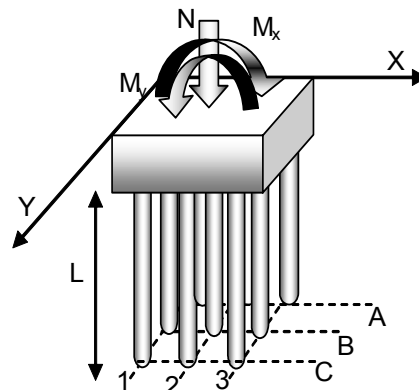


Figura 41

La tensión en cada pilote será igual a:

$$\sigma_i = \frac{N}{\sum \Omega_i} \pm \frac{M_y \cdot y_i}{J_x} \pm \frac{M_x \cdot x_i}{J_y}$$

Si se desprecia el momento de inercia propio de cada pilote respecto del momento estático de cada área queda:

$$J_x = \sum \Omega_i \cdot y_i^2 \quad \text{y} \quad J_y = \sum \Omega_i \cdot x_i^2$$

A su vez si las áreas de todos los pilotes son iguales, la carga que toma cada uno de ellos resulta:

$$\sigma_i \cdot \Omega_i = P_i = \frac{N}{n} \pm \frac{M_y \cdot y_i}{\sum y_i^2} \pm \frac{M_x \cdot x_i}{\sum x_i^2}$$

Para la distribución de cargas horizontales puede adoptarse simplificada el método de las longitudes equivalentes (figura 42).

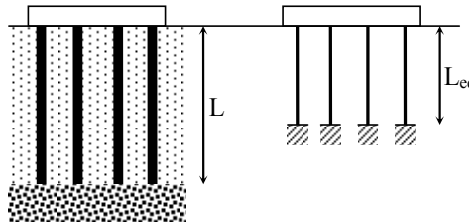


Figura 42

En este caso se fija una longitud equivalente para un pilote libre del suelo lateral y empotrado en la base. Esta longitud equivalente depende de las características del suelo y de las dimensiones del pilote. Las ecuaciones para determinarla son las siguientes:

Arcillas de módulo $E = \text{cte}$ $\rightarrow L_{eq} = 1,2 \cdot \sqrt[4]{\frac{E_p \cdot J_p}{E/3}}$

Arenas o arcillas con módulos E_o (cabeza) y E_z (base) $\rightarrow L_{eq} = 1,2 \cdot f \cdot \sqrt[4]{\frac{E_p \cdot J_p}{E_z / E}}$

El valor de "f" se obtiene de la siguiente tabla:

E_o/E_z	f
0	1,7
0,5	1,25
1,0	1,0

Con este esquema se calcula la rigidez " R_i " de cada pilote en cada dirección y se distribuyen las fuerzas horizontales " H_x " y " H_y " de acuerdo a:

$$H_{ix} = \frac{H_x \cdot R_i}{\sum R_i} \quad \text{y} \quad H_{iy} = \frac{H_y \cdot R_i}{\sum R_i}$$

Si existen rigideces muy diferentes entre líneas de pilotes pueden aparecer excentricidades " e_x " y " e_y ", entre el centro de rigidez y el punto de aplicación de las cargas horizontales, lo que genera un esfuerzo adicional debido a los momentos producido ($M = H \cdot e$).

Para distribuir este momento por línea de pilotes se opera de forma análoga a la distribución de cortantes en pórticos en altura. Es decir se determina la rigidez de cada línea de pilotes (R_{iL}) y se distribuye la fuerza en cada pilote en función de su distancia al centro de rigidez, como:

$$\Delta H_{ix} = \frac{M_x \cdot R_{iLx} \cdot y_i}{\sum R_{iLx} \cdot y_i^2} \quad \text{y} \quad \Delta H_{iy} = \frac{M_y \cdot R_{iLy} \cdot x_i}{\sum R_{iLy} \cdot x_i^2}$$

Esta fuerza debe ser sumada, según su sentido, a la fuerza horizontal obtenida anteriormente para encontrar la fuerza horizontal por cada dirección en cada elemento. Es decir:

$$H_{iT_x} = H_{ix} \pm \Delta H_{ix} \quad \text{y} \quad H_{iT_y} = H_{iy} \pm \Delta H_{iy}$$

La fuerza horizontal resultante en cada pilote será:

$$H_{iR} = \sqrt{(H_{iT_x})^2 + (H_{iT_y})^2}$$

6.1.- Pilotes traccionados

Para analizar los pilotes a esfuerzos de tracción puede realizarse una primera división entre pilotes y pilas o cilindros, es decir entre elementos esbeltos ($L/D > 10$), elementos poco esbeltos ($L/D < 5$) y fundaciones intermedias entre los límites anteriores.

Elementos esbeltos

Es el caso de la gran mayoría de los pilotes con ensanche inferior y sin ensanche inferior (figura 43).

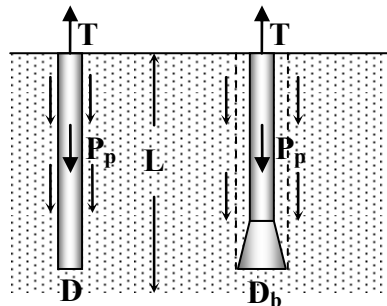


Figura 43

Si el pilote no tiene ensanche inferior la capacidad de carga a tracción es igual a la capacidad friccional de un pilote a compresión. Mientras que si el pilote tiene un ensanche inferior, la resistencia a tracción se calcula en función de la resistencia al corte del suelo, considerando un cilindro con diámetro igual al del ensanche inferior. Esto es especialmente válido en arenas poco densas y arcillas.

$$T_u = \pi \cdot D_b \cdot L \cdot \tau_{suelo} + P_p$$

Elementos de esbeltez intermedia

En este caso también los pilotes pueden o no tener ensanche inferior. El método planteado por Biarez y Barraud en la Universidad de Grenoble (Francia), adoptando un ángulo de cuña gravante de suelo y suponiendo que el suelo movilizado bajo la acción de tracción forma un tronco de cono arroja resultados compatibles con los ensayos de carga realizados y en general conservadores. Este ángulo de la cuña gravante se lo denomina λ y según esos autores puede estimarse como $\varphi/8$.

En esta circunstancia debe verificarse para un pilote de diámetro inferior " D_b ", longitud " L ", inmerso en un suelo con peso unitario " γ ", y con peso propio " P_p " que:

$$T_u = \left(\left[\frac{\pi \cdot L}{12} \left(2 \cdot D_b^2 + 4 \cdot L^2 \cdot \text{tg}^2 \lambda + \left(D_b \cdot \sqrt{D_b \cdot 2 \cdot L \cdot \text{tg} \lambda} \right) \right) \right] \cdot \gamma \right) + P_p$$

Elementos poco esbeltos

Para estos elementos suele emplearse el procedimiento planteado por Meyerhoff y Addams (1968) y por Das y Seely (1975). Se analizarán los casos de pilas o cilindros perforados con ensanche inferior inmersos en suelo arenoso y suelo cohesivo. En general puede decirse que:

$$T_{un} = T_{ug} + P_p$$

Pilas en arena: para este caso la fórmula de cálculo toma en cuenta el área de la base y el denominador factor de desconexión " B_q ". Si se tiene una pila de diámetro en la base " D_b ", largo " L ", inmersa en suelo con un peso unitario " γ ", queda:

$$T_{un} = B_q \cdot \frac{\pi \cdot D_b^2}{4} \cdot \gamma \cdot L \quad \text{y} \quad B_q = 2 \cdot \frac{L}{D_b} \cdot K_u \cdot \text{tg} \varphi \cdot \left(m \cdot \frac{L}{D_b} + 1 \right) + 1$$

Siendo:

$K_u \sim 0,9$ para $30^\circ < \varphi < 45^\circ$

$$m = 0,15 + \left(\frac{\varphi^\circ - 30}{15} \right) \cdot 0,35$$

B_q crece con la relación L/D_b hasta un valor crítico $(L/D_b)_{crit}$ y luego permanece constante. Esta relación crítica depende del ángulo de fricción interna del suelo y puede expresarse como:

$$\left(\frac{L}{D_b} \right)_{crit} \approx 4 + \left(\frac{\varphi^\circ - 30}{15} \right) \cdot 5$$

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

1. Determine L/D_b
2. Estime $(L/D_b)_{crit}$ y compárelo con el punto 1.
3. Si $(L/D_b) < (L/D_b)_{crit}$ aplica la siguiente fórmula:

$$T_u = B_q \cdot \frac{\pi \cdot D_b^2}{4} \cdot \gamma \cdot L + P_p$$

4. Si $(L/D_b) > (L/D_b)_{crit}$ aplica la siguiente fórmula:

$$T_u = B_q \cdot \frac{\pi \cdot D_b^2}{4} \cdot \gamma \cdot L + P_p + \int_0^{L_{crit}} (\pi \cdot D) \cdot \sigma_v' \cdot K_u \cdot \text{tg} \delta \cdot dz$$

El último término es la fricción desarrollada a lo largo del fuste del pilote por encima de la altura crítica, como un pilote convencional.

Pilas en arcilla: La carga neta de tracción puede definirse en forma análoga al caso de arenas como sigue:

$$T_{un} = (C_u \cdot B_c + \gamma \cdot L) \cdot \frac{\pi \cdot D_b^2}{4}$$

B_c es el factor de desconexión y crece con la relación de profundidad hasta un valor crítico donde permanece igual a 9, y se puede obtener del gráfico de la figura 44.

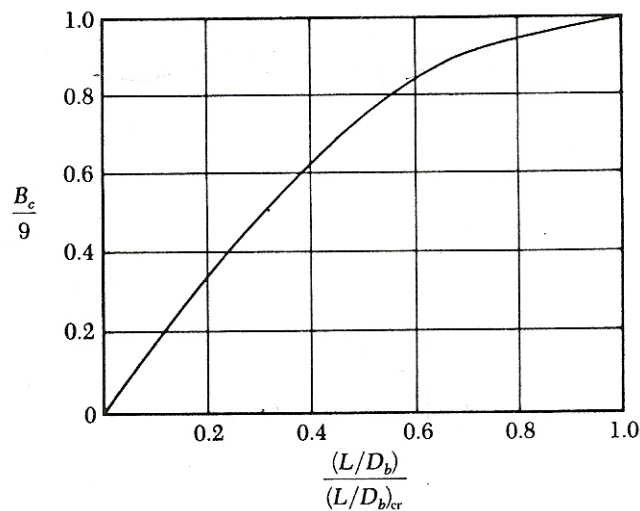


Figura 44

Donde:

$$\left(\frac{L}{D_b} \right)_{crit} = 10,7 \cdot C_u \text{ (kg/cm}^2\text{)} + 2,5 \leq 7$$

El procedimiento de cálculo puede sintetizarse como sigue:

1. Determine C_u y L/D_b
2. Obtenga $(L/D_b)_{crit}$ y L_{crit}
3. Si $(L/D_b) < (L/D_b)_{crit}$, se obtiene B_c de la figura ¿???. Y se calcula:

$$T_u = (C_u \cdot B_c + \gamma \cdot L) \cdot \frac{\pi \cdot D_b^2}{4} + P_p$$

4. Si $(L/D_b) > (L/D_b)_{crit}$, se adopta $B_c = 9$ y se emplea la fórmula:

$$T_u = (C_u \cdot 9 + \gamma \cdot L) \cdot \frac{\pi \cdot D_b^2}{4} + P_p + \Sigma(\pi \cdot D)(L - L_{crit}) \cdot \alpha \cdot C_u$$

El último término es la adhesión a lo largo del fuste de la pila por encima de la profundidad crítica.

Con estos métodos se obtienen en general valores conservadores en especial en suelos arenosos, para pilas construidas con métodos manuales o mecánicos.

7.- PILOTES SOMETIDOS A ESFUERZOS LATERALES

7.1. Introducción

En este capítulo se presentan el marco teórico de los métodos de cálculo existentes y una serie de antecedentes de pilotes sometidos a esfuerzos horizontales.

7.2. Evaluación del coeficiente de reacción del subsuelo

El término “Reacción del Subsuelo” (Terzaghi, 1955) indica la presión “ P ” por unidad de área de la superficie de contacto entre una viga cargada o una losa y el subsuelo en el cual descansa y transfiere las cargas.

El “Coeficiente de Reacción del Subsuelo” “ k_s ” es la relación entre esta presión en cualquier punto de la superficie de contacto y el asentamiento “ y ” producido por la carga aplicada en ese punto:

$$k_s = \frac{P}{y}$$

El valor de “ k_s ” depende de las propiedades elásticas del subsuelo y de las dimensiones del área actuante.

Factores que determinan los valores de K_h

Terzaghi (1955) realiza una serie de suposiciones fundamentales:

-La relación “ k ” entre la presión de contacto “ P ” y el correspondiente desplazamiento “ y ”, es independiente de la presión “ P ”.

-El coeficiente de reacción vertical del suelo “ k_s ” tiene el mismo valor para todos los puntos de la superficie en la que actúa la presión de contacto. Si el subsuelo consiste en una arcilla compacta, el coeficiente de reacción horizontal del subsuelo también tiene el mismo valor “ k_h ”, para cualquier punto de la superficie de contacto. Para suelos sin cohesión el valor del coeficiente de reacción horizontal es determinado por la ecuación:

$$k_h = n_h \cdot z$$

y el valor “ n_h ” se asume igual para todos los puntos de la superficie de contacto.

Pilotes sometidos a cargas horizontales

Para el caso de pilotes bajo cargas horizontales, Terzaghi (1955), realiza el siguiente análisis.

La figura 45 representa vigas verticales con un ancho “ B_1 ” las cuales han sido excavadas o hincadas en el subsuelo.

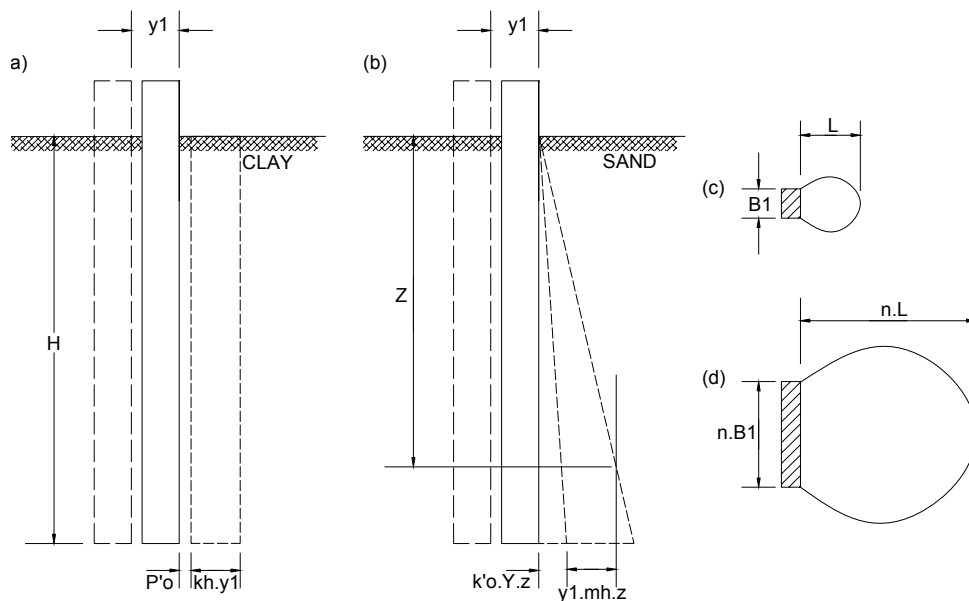


Figura 45. Viga vertical en (a) arcilla compacta, y (b) en arena; (c) influencia del ancho de la viga en las dimensiones del bulbo de presiones (After: Terzaghi, K., 1955)

Antes que cualquier fuerza horizontal fuera aplicada a los pilotes, la superficie de contacto entre los pilotes y el subsuelo está sometida, a cualquier profundidad “z” debajo de la superficie, a una presión “P_o” que es igual a por lo menos la presión del suelo en reposo para pilotes excavados o mayor a esta en pilotes hincados.

Si al pilote se le produce un desplazamiento en forma perpendicular a su ancho “B₁”, la presión en la cara opuesta del pilote decrece a un valor muy pequeño. Como este valor es menor que la presión activa del suelo, no se tiene en cuenta.

Al mismo tiempo y como resultado del mismo desplazamiento, la presión “P_p” en la cara del pilote, se incrementa desde su valor inicial “P_o” a un valor “P’_o” mayor.

El desplazamiento lateral “y_o” requerido para producir este cambio es muy pequeño por lo que puede ser despreciado. Por lo tanto, en el comienzo del movimiento del pilote, y₁=0, y las presiones en las dos caras del pilote son, a cualquier profundidad “z”

$$P_a = 0 \text{ (Lado Opuesto)}$$

$$P_p = P'_o > P_o \text{ (Lado Desplazado)}$$

Luego que el pilote se desplazó una distancia y₁ hacia la derecha tenemos:

$$P_a = 0 \text{ (Lado Opuesto)}$$

$$P_p = P'_o + P = P'_o + k_h \cdot y_1 \text{ (Lado Desplazado)}$$

Donde $P = k_h \cdot y_1$ es el aumento de la presión en la cara derecha a causa del desplazamiento “y₁” del pilote.

El valor de “k_h” y la variación de “k_h” con la profundidad dependen de las características de deformación del subsuelo.

Las características de deformación de un suelo cohesivo compacto son más o menos independientes de la profundidad. Por esto la reacción del subsuelo “ P ” tiene una distribución uniforme a lo largo de la cara del pilote y el coeficiente de reacción del subsuelo es:

$$k_h = \frac{P}{y_1}$$

Sin embargo, teniendo en cuenta la consolidación progresiva bajo carga constante, el valor “ y_1 ” aumenta y el valor de “ k_h ” decrece con el tiempo, y ambos se aproximan a los valores últimos.

En suelos sin cohesión, “ y_1 ” y “ k_h ” son prácticamente independientes del tiempo. Sin embargo, el módulo de elasticidad aumenta aproximadamente en forma lineal con la profundidad. Por consiguiente, se puede asumir sin serios errores que la presión “ P ” requerida para producir un desplazamiento horizontal “ y_1 ” dado aumenta en forma lineal con la profundidad, y:

$$k_h = \frac{P}{y_1} = m_h \cdot z$$

En la figura 45 se muestran los bulbos de presiones para las vigas de ancho “ B_1 ” y “ nB_1 ”. Las longitudes de estos bulbos, medidas en la dirección del movimiento de los pilotes, son “ L ” y “ nL ” respectivamente. Además, tanto en suelos cohesivos como y en no cohesivos el módulo de elasticidad “ E ” es constante en la dirección horizontal. Por lo que, el desplazamiento horizontal “ y ” aumenta en forma lineal con el ancho “ B_1 ”, $y_n = n \cdot y_1$.

Para pilotes en suelos cohesivos:

$$k_{h_n} = \frac{P}{y_n} = \frac{P}{n \cdot y_1} = \frac{P}{y_1} \cdot \frac{B_1}{n \cdot B_1}$$

Sustituyendo $k_{h_n} = k_h$, $B_1=1\text{ft}$ (0,3m), $nB_1=B$, y $\frac{P}{y_1} = k_{h1}$ en esta ecuación se obtiene:

$$k_h = \frac{P}{y_1} \frac{1}{B} = \frac{1}{B} k_{h1}$$

Donde “ k_{h1} ” es el coeficiente de reacción horizontal del subsuelo para un pilote, con un ancho de 0,3m, en suelo cohesivo.

Para pilotes en suelos no cohesivos:

$$k_{h_n} = m_{h_n} \cdot z = \frac{P}{y_n} = \frac{P}{n \cdot y_1}$$

Como

$$\frac{P}{y_1} = m_{h1} \cdot z,$$

$$k_{h_n} = \frac{1}{n} \cdot m_{h1} \cdot z = m_{h1} \cdot B_1 \cdot \frac{z}{n \cdot B_1}$$

Sustituyendo $k_{h_n} = k_h$, $B_1=1\text{ft}$ (0,3m), $nB_1=B$, y $m_{h1} \cdot B_1 = n_h$,

$$k_h = n_h \cdot \frac{z}{B}$$

Donde “ n_h ” (kN/m^3) es la constante de reacción horizontal del subsuelo. Para pilotes verticales, la presión “ P ” puede asumir valores que son muchas veces mayores que “ $P'o$ ”. Por lo que es común asumir que $P'o=0$, entonces:

$$P_p = P = k_h \cdot y$$

Procedimiento general para la evaluación de los coeficientes de reacción del subsuelo

Los valores numéricos de los coeficientes de reacción del subsuelo “ k_s ” y “ k_h ” requeridos para la solución de problemas ingenieriles pueden ser estimados (Terzaghi, 1955) en base de información publicada o también pueden ser derivadas de resultados de ensayos de campo llevados a cabo en el subsuelo de la estructura propuesta.

- Reacción horizontal del subsuelo en pilotes verticales

Si un pilote vertical está embebido en suelo no cohesivo, el coeficiente de reacción horizontal del subsuelo “ k_h ” a una profundidad “ z ” depende del ancho “ B ” del pilote medido perpendicularmente a la dirección del desplazamiento, del peso unitario efectivo “ γ ” y de su densidad relativa.

A cualquier profundidad “ z ” por debajo de la superficie del terreno, el módulo de elasticidad “ E_s ” es aproximadamente igual a:

$$E_s = A \cdot p_v$$

Donde “ A ” es un coeficiente que depende sólo de la densidad, y “ p_v ” es la presión de sobrecarga efectiva a la profundidad “ z ”.

Si “ γ ” es el peso unitario efectivo de la arena, $p_v = \gamma \cdot z$, y

$$E_s = \gamma \cdot z \cdot A$$

El coeficiente de reacción horizontal del subsuelo para un pilote con un ancho “ B ” se determina por la relación entre la presión de contacto “ P ” y el correspondiente desplazamiento lateral de la cara de contacto. El desplazamiento se produce por la deformación del medio adyacente con un módulo de elasticidad “ E_s ”.

Desplazamientos mayores a una distancia de $3B$ prácticamente no tienen influencia en los momentos flectores locales.

Por esto el desplazamiento “ y ” puede computarse con la asunción de que la presión “ P ” actúa en una capa elástica de espesor igual a $3B$.

Por esta asunción la teoría de la elasticidad lleva a la ecuación:

$$P = y \cdot \frac{E_s}{1,35 \cdot B} = y \cdot \frac{A \cdot \gamma \cdot z}{1,35 \cdot B}$$

De donde

$$k_h = \frac{P}{y} = \frac{A \cdot \gamma}{1,35} \cdot \frac{z}{B} = m_h \cdot z = n_h \cdot \frac{z}{B}$$

El factor $n_h = \frac{A \cdot \gamma}{1,35}$

El valor "A" varía en un rango entre 100 para suelo no cohesivo suelto y 2000 para suelos no cohesivos densos.

En suelo suelto "A" se mantiene constante para presiones de confinamiento de hasta 50kg/cm². Para suelos densos "A" comienza a decrecer cuando "P_p" toma valores mayores a 3kg/cm².

El peso unitario de estos suelos secos ó húmedos, varía entre 13 y 19kN/m³, siendo el promedio:

$$\gamma = 16kN / m^3$$

Y el peso efectivo unitario sumergido varía entre 8 y 12kN/m³, siendo el promedio:

$$\gamma = 10kN / m^3$$

Con estos valores se calculó la tabla siguiente, que muestra los valores de "n_h" para un pilote de 0,3m de ancho, embebido en una arena húmeda y sumergida.

Densidad Relativa de la Arena	Suelta	Media	Densa
Rango de valores de A	1000-3000	3000-10000	10000-20000
Valores Adoptados de A	2000	6000	15000
Arena Seca o Húmeda, valores de n _h	2460	7370	19660
Arena Sumergida, valores de n _h	1400	4920	11940

Para pilotes embebidos en suelo cohesivo compacto, los valores de "k_{h1}" se asumen aproximadamente iguales a los valores "k_{s1}" para vigas cargadas en la superficie horizontal de la misma arcilla.

El valor de "k_h" para un pilote con un ancho B en pies (feet) está dado por la siguiente ecuación:

$$k_h = \frac{1}{B} \cdot k_{h1} = \frac{1}{B} \cdot k_{s1} = \frac{1}{1.5 \cdot B} \bar{k}_{s1}$$

Los valores de \bar{k}_{s1} están dados en la tabla que sigue:

Consistencia de la arcilla	Compactas	Muy Compactas	Duras
Valores de q _u , kN/m ²	105-215	215-320	>430
Rango para k _{s1} , platos cuadrados	17650-35300	35300-70600	>70600
Valores Propuestos, platos cuadrados	26500	53000	100000

Los valores de “ n_h ” o de “ k_h ” para pilotes pueden ser determinados también por experimentación.

Estos experimentos consisten en realizar ensayos sobre pilotes excavados o hincados tomando medida de los valores de desplazamientos de la cabeza del pilote cuando éste es sometido a una fuerza horizontal.

7.3. Comportamiento de pilotes cargados lateralmente

Un pilote vertical resiste cargas laterales movilizándose la presión pasiva del suelo que lo rodea (Das, 2001). La reacción del suelo depende de (a) la rigidez del pilote, (b) la rigidez del suelo y (c) la restricción en los extremos del pilote. Los pilotes se clasifican en 2 tipos principales: (1) pilotes cortos o rígidos y (2) pilotes largos o elásticos. Esta interacción produce esfuerzos en los pilotes, los que pueden ser cuantificados, aplicando teorías que suponen al suelo como un medio elástico o en fase de rotura. En la figura 46 podemos ver la variación de la deflexión y la distribución del momento y fuerza cortante a lo largo de su longitud.

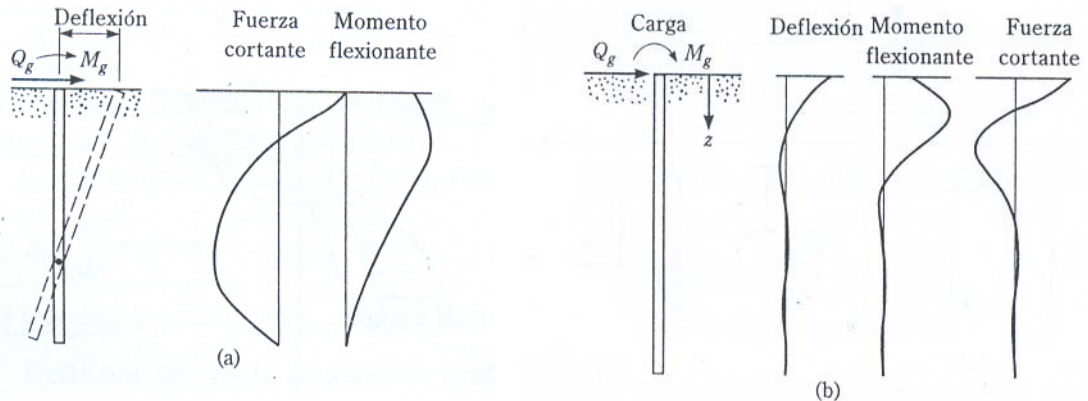


Figura 46. Variación de la deflexión, momento y fuerza cortante en pilotes (a) rígidos y (b) elásticos. (After: Das, B., 2001).

Solución elástica

Matlock y Reese (1960) desarrollaron un método para determinar momentos y desplazamientos en un pilote inmerso en suelo granular y sometido a carga lateral y momento.

Si se considera un pilote de longitud “ L ” sometido a una fuerza lateral “ Q_g ” y a un momento “ M_g ” en la superficie según puede verse en la figura 47a. En las figuras 47b y c se esquematiza la forma deflexionada del pilote y la reacción del suelo para la carga y momento aplicados.

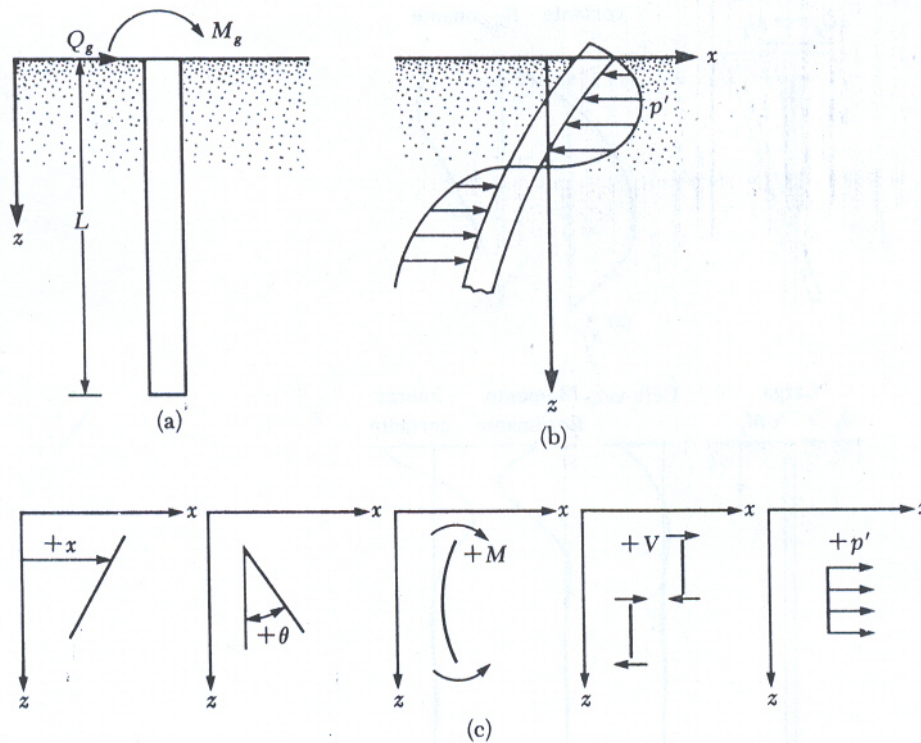


Figura 47. (a) Pilote cargado lateralmente; (b) resistencia del suelo sobre un pilote causada por carga lateral; (c) convenciones de signo. (After: Das, B., 2001).

Según el modelo de Winkler, un medio elástico puede reemplazarse por una serie de resortes elásticos independientemente infinitamente cercanos entre sí, sin interacción entre ellos.

$$k = \frac{p'(KN / m)}{x(m)}$$

k = módulo de reacción del subsuelo

p' = presión sobre el suelo

x = deflexión

El módulo del subsuelo para suelos granulares a una profundidad “ z ” es

$$k_z = n_h z$$

n_h = constante del módulo de la reacción horizontal del subsuelo

Utilizando la teoría de vigas sobre cimentación elástica

$$E_p I_p \frac{d^4 x}{dz^4} = p'$$

E_p = módulo de elasticidad del material del pilote

I_p = momento de inercia de las sección del pilote

En base al modelo de Winkler

$$p' = -kx$$

el signo es negativo porque la reacción del suelo tiene dirección opuesta a la de la deformación del pilote.

Combinando estas dos últimas ecuaciones resulta

$$E_p I_p \frac{d^4 x}{dz^4} + kx = 0$$

La solución de esta ecuación conduce a las siguientes expresiones:

Deflexión del pilote a cualquier profundidad "x"

$$x_z(z) = A_x \frac{Q_g T^3}{E_p I_p} + B_x \frac{M_g T^2}{E_p I_p}$$

Pendiente del pilote a cualquier profundidad

$$\theta_z(z) = A_\theta \frac{Q_g T^2}{E_p I_p} + B_\theta \frac{M_g T}{E_p I_p}$$

Momento del pilote a cualquier profundidad

$$M_z(z) = A_m Q_g T + B_m M_g$$

Fuerza cortante sobre el pilote a cualquier profundidad

$$V_z(z) = A_v Q_g + B_v \frac{M_g}{T}$$

Reacción del suelo a cualquier profundidad

$$p'_z(z) = A_p' \frac{Q_g}{T} + B_p' \frac{M_g}{T^2}$$

Donde A_x , B_x , A_θ , B_θ , A_m , B_m , A_v , B_v , A_p' y B_p' son coeficientes que dependen de la profundidad y rigidez relativa entre suelo y pilote.

T = longitud característica del pilote

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{n_h}}$$

Cuando $L \geq 5T$, el pilote se considera como *pilote largo*. Para $L \leq 2T$, se considera como *pilote corto* o *rígido*. La tabla siguiente muestra los valores de los coeficientes de las ecuaciones anteriores para pilotes largos. En la primera columna de la tabla, "Z" es la profundidad adimensional, o $Z = z/T$.

Coefficientes para pilotes largos, $k_z = n_h z$ (After: Das, B., 2001).

Z	A _x	A ₀	A _m	A _v	A _p	B _x	B ₀	B _m	B _v	B _p
0	2,435	-1,623	0	1	0	1,623	-1,75	1	0	0
0,1	2,273	-1,618	0,1	0,989	-0,227	1,453	-1,65	1	-0,007	-0,145
0,2	2,112	-1,603	0,198	0,956	-0,422	1,293	-1,55	0,999	-0,028	-0,259
0,3	1,952	-1,578	0,291	0,906	-0,586	1,143	-1,45	0,994	-0,058	-0,343
0,4	1,796	-1,545	0,379	0,84	-0,718	1,003	-1,351	0,987	-0,095	-0,401
0,5	1,644	-1,503	0,459	0,764	-0,822	0,873	-1,253	0,976	-0,137	-0,436
0,6	1,496	-1,454	0,532	0,677	-0,897	0,752	-1,156	0,96	-0,181	-0,451
0,7	1,353	-1,397	0,595	0,585	-0,947	0,642	-1,061	0,939	-0,226	-0,449
0,8	1,216	-1,335	0,649	0,489	-0,973	0,54	-0,968	0,914	-0,27	-0,432
0,9	1,086	-1,268	0,693	0,392	-0,977	0,448	-0,878	0,885	-0,312	-0,403
1	0,962	-1,197	0,727	0,295	-0,962	0,364	-0,792	0,852	-0,35	-0,364
1,2	0,738	-1,047	0,767	0,109	-0,885	0,223	-0,629	0,775	-0,414	-0,268
1,4	0,544	-0,893	0,772	-0,056	-0,761	0,112	-0,482	0,688	-0,456	-0,157
1,6	0,381	-0,741	0,746	-0,193	-0,609	0,029	-0,354	0,594	-0,477	-0,047
1,8	0,247	-0,596	0,696	-0,298	-0,445	-0,03	-0,245	0,498	-0,476	0,054
2	0,142	-0,464	0,628	-0,371	-0,283	-0,07	-0,155	0,404	-0,456	0,14
3	-0,075	-0,04	0,225	-0,349	0,226	-0,089	0,057	0,059	-0,213	0,268
4	-0,05	0,052	0	-0,106	0,201	-0,028	0,049	-0,042	0,017	0,112
5	-0,009	0,025	-0,033	0,015	0,046	0	-0,011	-0,026	0,029	-0,002

La figura 48 muestra la variación de los coeficientes “A” y “B” para diversos valores de $L/T = Z_{máx}$. Podemos ver que cuando L/T es mayor que aproximadamente 5, los coeficientes no cambian, lo que es cierto sólo en pilotes largos.

El cálculo de la longitud característica T para el pilote requiere suponer un valor apropiado para “ n_h ”. En la tabla que sigue se pueden apreciar algunos valores representativos.

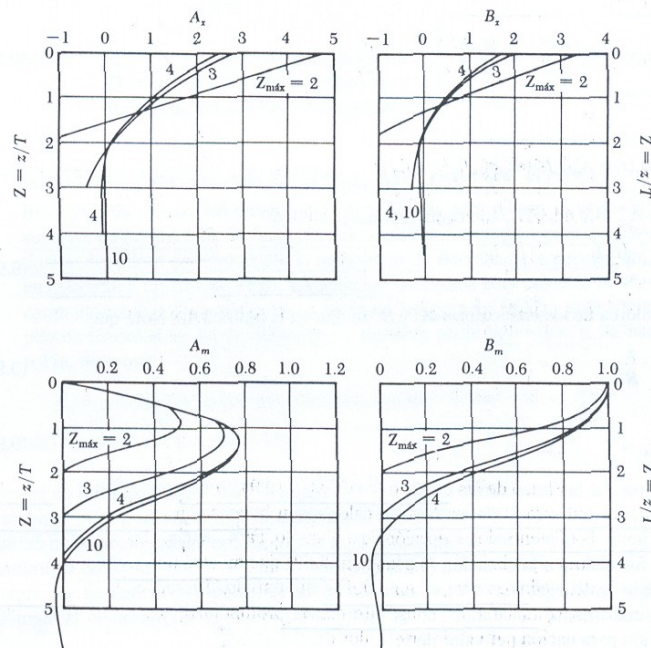


Figura 48. Variación de los coeficientes A y B con Z (After: Matlock y Reese, 1960).

Valores representativos para n_h . (After: Das, B., 2001).

Suelo	Nh kN/m3
Arena seca	
o	
Arena húmeda	
Suelta	1800-2200
Media	5500-7000
Densa	15000-18000
Arena sumergida	
Suelta	1000-1400
Media	3500-4500
Densa	9000-12000

Soluciones elásticas similares a las anteriores pero para pilotes hincados en suelo cohesivo fueron desarrolladas por Davisson y Gill (1963) y se dan en las siguientes ecuaciones.

Deflexión del pilote a cualquier profundidad "x"

$$x_z(z) = A_x \frac{Q_g R^3}{E_p I_p} + B_x \frac{M_g R^2}{E_p I_p}$$

Momento del pilote a cualquier profundidad

$$M_z(z) = A_m Q_g R + B_m M_g$$

Los valores de los coeficientes A' y B' se dan en la figura 2.5 Siendo

$$Z = z/R$$

$$Z_{\max} = L/R$$

$$R = \sqrt[4]{\frac{E_p I_p}{k}}$$

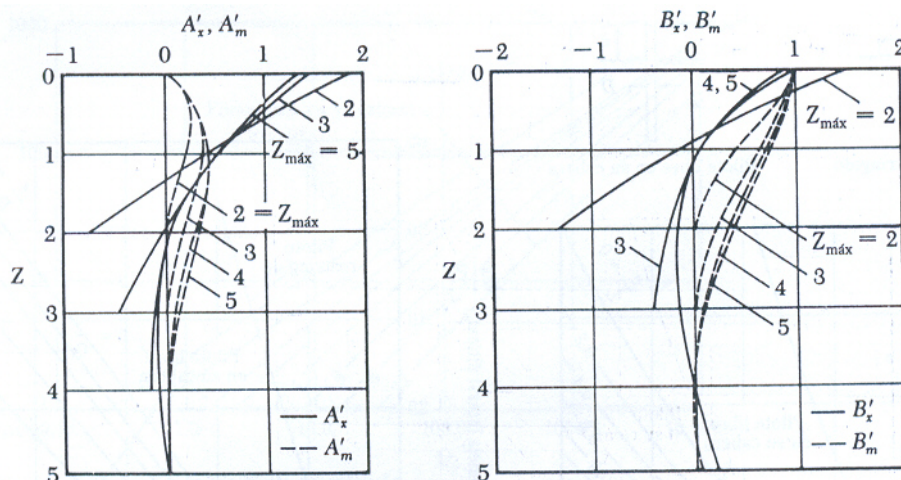


Figura 49. Variación de A'x, B'x, A'm y B'm con Z (After: Davisson y Gill, 1963).

“ k ” es el coeficiente de reacción del subsuelo, que para suelos granulares tiene una variación lineal con la profundidad. En suelos cohesivos se supone aproximadamente constante con la profundidad. Para estos suelos Vesic (1961) propuso la siguiente ecuación

$$k = 0,6512 \sqrt{\frac{E_s D^4}{E_p I_p}} \frac{E_s}{1 - \mu_s^2}$$

Solución Elásto-Plástica. Curvas $p-u$

El método descrito anteriormente es sólo aplicable a pilotes con deformaciones dentro del rango elástico del suelo. Sin embargo, éstas pueden extenderse más allá del rango elástico cuando el suelo se deforma plásticamente. Esto puede hacerse empleando el artificio de las curvas $p-u$ (Matlock y Reese, 1961), que representan la deformación del suelo a cualquier profundidad para un rango de tensiones horizontales de cero hasta el punto de fluencia donde la deformación crece sin incremento de la carga. Las curvas “ $p-u$ ” son independientes de la forma y rigidez del pilote y representan la deformación de un área discreta de suelo que no es afectada por la carga por encima y por debajo de ella. La forma de una de estas curvas puede verse en la figura 50.

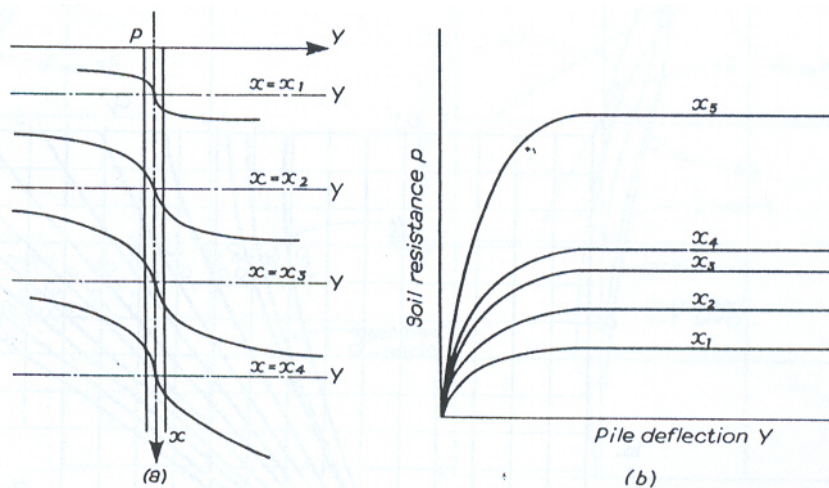


Figura 50. Curvas $p-u$ para pilotes cargados lateralmente. (a) curvas para varias profundidades x por debajo de la superficie del terreno. (b) curvas dibujadas en ejes comunes. (After: Tomlinson, M. J., 1981).

Las curvas individuales pueden dibujarse en un par de ejes comunes dando una familia de curvas para las profundidades seleccionadas. Para que la deformada del pilote pueda predecirse correctamente, las deformaciones estimadas en el análisis elástico deben ser compatibles con las obtenidas en las curvas “ $p-u$ ”. Las deformaciones obtenidas por el análisis elástico inicial están basadas en un módulo de reacción del subsuelo supuesto “ n_h ” que debe compararse con el módulo obtenido de las presiones correspondientes a estas deformaciones, obtenidas de las curvas “ $p-u$ ”.

Si el módulo, expresado en términos del factor “ T ”, no corresponde, el factor debe modificarse efectuando un ajuste al módulo del suelo “ E ” y de este a un nuevo valor de “ n_h ” y por lo tanto del factor “ T ”. Las deformaciones son recalculadas y las presiones correspondientes son de nuevo obtenidas a través

de las curvas “ $p-y$ ”. Esto resulta en un nuevo valor del módulo del suelo que se compara nuevamente con el segundo valor de prueba y se repite el proceso hasta llegar a un resultado razonable.

Los métodos para dibujar curvas “ $p-u$ ” fueron desarrollados para suelos con un módulo linealmente creciente.

El método de Matlock (1961) se utiliza para arcillas blandas a firmes. El primer paso es calcular la resistencia última de la arcilla a carga lateral.

Por debajo de la profundidad crítica el factor “ N_c ” se considera igual a 9. Por encima se utiliza la siguiente ecuación

$$N_c = 3 + \frac{\gamma x}{c_u} + \frac{Jx}{B}$$

γ = peso específico del suelo

x = profundidad

c_u = cohesión no drenada del suelo

J = factor empírico

B = ancho del pilote

Los valores de “ J ” son 0,5 para arcilla blanda y 0,25 para una arcilla más dura.

La profundidad crítica es:

$$x_r = \frac{6B}{\frac{\gamma B}{c_u} + J}$$

La resistencia última por encima y por debajo de la profundidad crítica se expresa en las curvas “ $p-u$ ” en términos de un fuerza “ p_u ” por unidad de longitud del pilote:

$$p_u = N_c c_u B$$

Hasta el punto A de la figura 51 la forma de la curva “ $p-u$ ” se deriva de la de una curva tensión-deformación obtenida de un ensayo de compresión triaxial no drenado o de un curva carga-deformación de un ensayo de plato de carga. La forma de la curva se define por

$$\frac{p}{p_u} = 0,53 \sqrt{\frac{y}{y_c}}$$

“ y_c ” es la deformación correspondiente a la deformación “ ε_c ” a una tensión igual a la máxima tensión que resulta de una curva tensión-deformación de una prueba de laboratorio. Matlock (1961) aconseja valores de “ ε_c ” de 0,005 para arcillas sensibles y 0,020 para arcillas perturbadas o sedimentos no consolidados.

También aconseja un valor promedio de 0,010 para arcillas normalmente consolidadas para ser usado en

$$y_c = 2,5 \varepsilon_c B$$

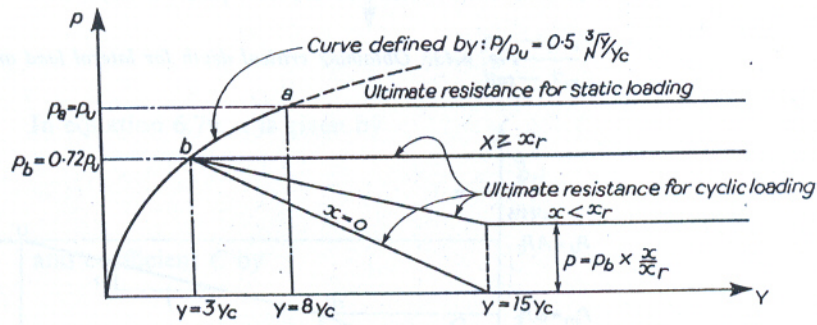


Figura 51. Determinación de la forma de una curva $p-u$ en arcilla blanda a firme (según Matlock, 1970). (After: Tomlinson, M. J., 1981).

El efecto de cargas cíclicas para profundidades mayores que la crítica pueden permitirse cortando la curva “ $p-u$ ” por una línea horizontal que represente la resistencia última “ p_b ” de arcillas bajo cargas cíclicas. El punto B de intersección de esta línea con la curva “ $p-u$ ” está dado por

$$p_b / p_u = 0,72$$

Las curvas “ $p-u$ ” para cargas cíclicas con valores de y/y_c de 3 a 15 y para profundidades menores que la crítica se pueden ver en la figura 51.

Teoría del pilote corto

Este método se aplica para cilindros y pilotes poco esbeltos inmersos en suelos granulares o cohesivos. Se basa en la teoría de Winkler y al tratarse de un elemento muy rígido permite determinar mediante formulaciones directas los esfuerzos a lo largo del pilote y en la base del mismo.

Suelo granular o poco cohesivo

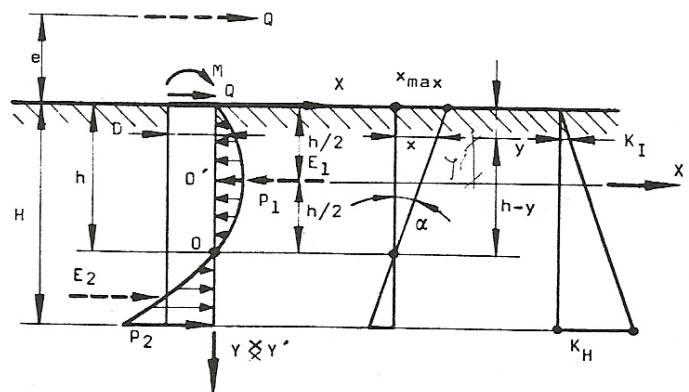


Figura 52

En estos suelos se admite una variación lineal del coeficiente de reacción lateral, tal como se aprecia en la figura 52.

Resolviendo las ecuaciones se obtienen las siguientes fórmulas para calcular los esfuerzos de corte, momento flector, desplazamiento máximo en la cabeza y presiones laterales.

El procedimiento de cálculo se sintetiza como sigue:

1. Se calcula la presión horizontal máxima (p_1). Con ella se obtiene el empuje actuante contra el suelo (E_1) para compararlo con el empuje resistente (E_p).

$$p = K_H \frac{z}{H} (h-z) \operatorname{tg} \alpha \rightarrow p_1; p_2 \rightarrow p_1 \Rightarrow E_1 \text{ y } p_2 \Rightarrow E_2$$

$$E_{p1} = 0,5 \cdot K_p \cdot \gamma \cdot h^2 + 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_p} \cdot h \dots E_{pt} = 0,5 \cdot K_p \cdot \gamma \cdot H^2 + 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_p} \cdot H \rightarrow E_{p2} = E_{pt} - E_{p1}$$

$$v_1 = \frac{E_{p1}}{E_1} \text{ y } v_2 = \frac{E_{p2}}{E_2}$$

2. Se determinan los Momentos flectores a distintas profundidades, y con ellos se dimensiona seccionalmente el pilote.

$$M = Q(e+z) + \frac{Q \cdot e \cdot z^3}{H^4} \cdot (3z-4H) + \frac{Q \cdot z^3}{H^3} \cdot (2z-3H)$$

3. Se calculan los esfuerzos de corte a distintas profundidades, con ellos se verifica seccionalmente el pilote.

$$V_y = Q - \frac{12Qez^2}{H^4} \cdot (H-z) + \frac{Qz^2}{H^3} \cdot (8z-9H)$$

4. Se obtiene el desplazamiento máximo lateral que debe ser menor al admisible.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{12Q}{DH^3} \frac{(2H+3e)}{K_H} \rightarrow x_{\max} = h \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

Suelo arcilloso o cohesivo

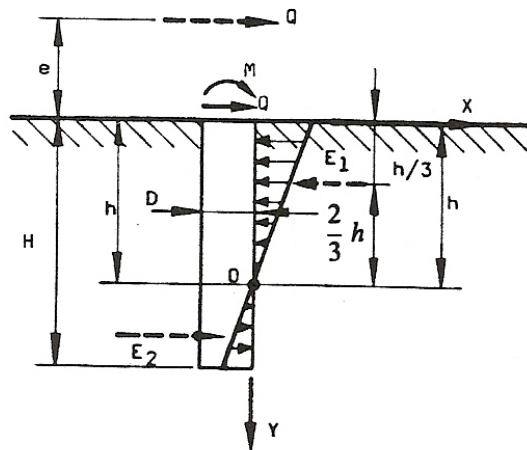


Figura 53

En los suelos cohesivos el coeficiente de reacción lateral es constante en profundidad y por lo tanto la variación de presiones laterales es linealmente variable, como se aprecia en la figura 53.

De forma análoga se obtiene:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{6Q}{DH^3} \frac{(2e+H)}{K_H} \rightarrow x_{\max} = h \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

La profundidad "h" a la que se anulan los esfuerzos laterales será:

$$h = \frac{3e + 2H}{6e + 3H} \cdot H \rightarrow e = \frac{M}{Q}$$

Las presiones laterales a ambos lados del pilote se obtienen como:

$$p_1 = \frac{2 \cdot Q}{D \cdot H^2} [3 \cdot e + 2 \cdot H] \quad \text{y} \quad p_2 = \frac{2 \cdot Q}{D \cdot H^2} [3 \cdot e + H]$$

Realizándose las mismas verificaciones que en el caso anterior.

Análisis en fase de rotura

Método de Broms

Resistencia lateral de pilotes en suelos incoherentes:

Broms (1964) estudió el comportamiento de pilotes en suelos no cohesivos sometidos a cargas horizontales en rotura. La falla se produce cuando el momento flector máximo en el pilote cargado alcanza el valor de la resistencia del material del pilote o cuando los valores de presiones horizontales alcanzan la resistencia lateral última del suelo a lo largo del pilote.

Deflexiones laterales:

Rifaat (1935) sugirió que las deflexiones laterales en la superficie del terreno “yo” pueden expresarse en función de la deflexión adimensional:

$$\frac{y_0(EI)^{3/5}(nh)^{2/5}}{PL} \quad \text{y} \quad \frac{y_0(EI)^{4/5}(nh)^{1/5}}{ML}$$

y la profundidad adimensional “ ηL ” en la cual

$$\eta = \sqrt[5]{\frac{nh}{EI}}$$

La deflexión adimensional ha sido dibujada en función de la profundidad adimensional “ ηL ” en la figura 54.

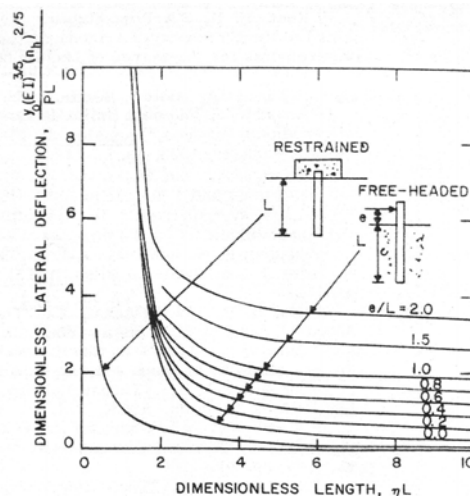


Figura 54. Deflexiones laterales en la superficie del terreno (After: Broms, B., 1964)

Puede observarse que el pilote se comporta como un miembro infinitamente rígido cuando la longitud adimensional “ ηL ” es menor a 2 y como un miembro infinitamente largo cuando “ ηL ” es mayor a 4. Para pilotes cortos ($\eta L < 2$) un incremento en la longitud disminuye las deflexiones laterales, mientras que para pilotes largos ($\eta L > 4$) las deflexiones no se ven afectadas por un cambio en la longitud. Por otro lado, un incremento en la rigidez EI disminuye las deflexiones en pilotes largos pero no afecta las deflexiones en pilotes cortos.

- Pilotes Largos

La deflexión lateral “ y_0 ” en la superficie del terreno puede calcularse para un pilote largo libre en su cabeza con la siguiente fórmula:

$$y_0 = \frac{2,40.P}{nh^{3/5}(EI)^{2/5}}$$

Y para un pilote restringido al giro en su cabeza:

$$y_0 = \frac{0,93.P}{nh^{3/5}(EI)^{2/5}}$$

siendo:

P = carga lateral aplicada

nh = coeficiente que depende de la densidad relativa del suelo alrededor del pilote

EI = rigidez del pilote

- Pilotes Cortos

La deflexión lateral “ y_0 ” en la superficie del terreno puede calcularse para un pilote corto libre en su cabeza con la siguiente fórmula:

$$y_0 = \frac{18.P \left(1 + 1,33 \frac{e}{L} \right)}{L^2 nh}$$

siendo:

e = excentricidad de la carga aplicada

y para un pilote corto restringido al giro:

$$y_0 = \frac{2.P}{L^2 nh}$$

L = longitud enterrada

Resistencia lateral última:

La forma de falla se muestra en la figura 59(a). Al llegar a la falla, el suelo ubicado por delante del pilote se mueve hacia arriba, mientras que el suelo ubicado por detrás se mueve hacia abajo para llenar el espacio creado debido al desplazamiento lateral del pilote.

Cerca de la superficie del terreno se desarrollan empujes pasivos en la parte delantera del pilote y empujes activos en la parte de atrás cuando la rotación excede 0,002 y 0,006 radianes para una arena compacta y suelta

respectivamente. Los empujes del suelo pueden calcularse por las teorías clásicas de empujes para una profundidad de hasta 1 diámetro del pilote considerando que el pilote es infinitamente ancho.

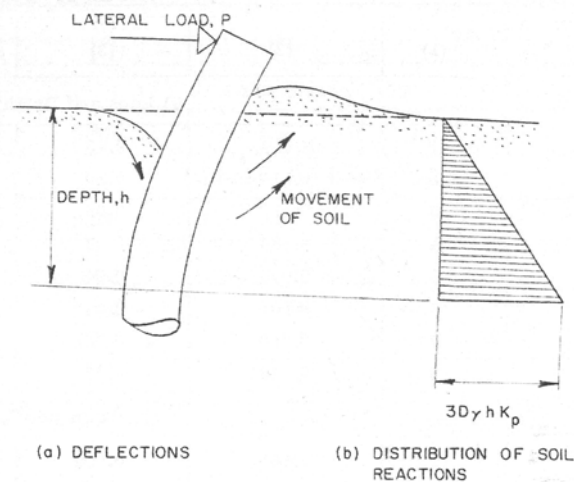


Figura 59. Distribución asumida de las reacciones del suelo (After: Broms, B., 1964)

Si se asume que la superficie del pilote no tiene fricción, los empujes horizontales pueden calcularse con la teoría de Rankine.

En el análisis que sigue, se ha asumido que el empuje activo es pequeño comparado con el empuje pasivo y no se ha considerado en los cálculos. También se ha asumido que el empuje horizontal que se desarrolla al momento de falla es igual a 3 veces el empuje pasivo de Rankine y que este empuje es independiente de la forma seccional del pilote.

La distribución de empujes horizontales asumidos en el momento de falla se muestra en la figura 59(b)

La reacción del suelo por unidad de longitud a una profundidad "z" por debajo de la superficie del terreno es:

$$Q = 3.D.\gamma.z.k_p$$

D= diámetro del pilote

g= peso específico del suelo

k_p = coeficiente de empuje pasivo

- Pilote corto libre en la cabeza

El modo de falla de un pilote corto libre en la cabeza puede verse en la figura 60. La falla se produce cuando el pilote rota como una unidad alrededor de un punto por debajo de la superficie del suelo. La distribución de empujes horizontales y momentos correspondientes se muestra en figura 260(b) y 60(c).

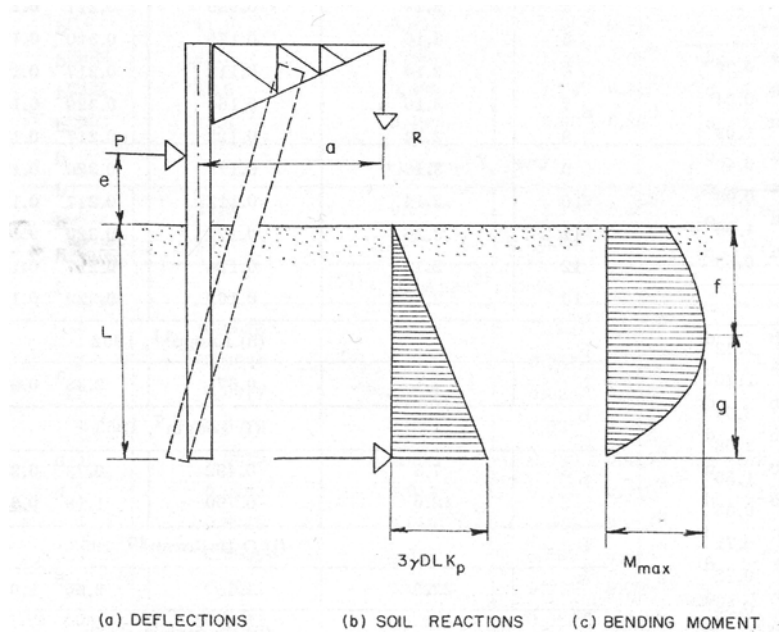


Figura 60. Pilote corto libre en su cabeza – Distribución de deflexiones, reacciones del suelo y momentos (After: Broms, B., 1964)

Cerca de la punta del pilote se desarrollan empujes negativos de considerable magnitud. Estos empujes pueden reemplazarse para el análisis por una carga concentrada tal como puede verse en la figura 60(b).

La resistencia lateral última puede evaluarse por consideraciones de equilibrio. El momento causado por las cargas aplicadas “P” y “R” con respecto a la punta del pilote es:

$$Md = P(e + L) + R.a$$

El momento correspondiente en el instante de falla causado por los empujes laterales del suelo que actúan a lo largo de pilote es:

$$Mr = 0,5.\gamma.D.L^3.kp$$

La condición de equilibrio exige que los 2 momentos sean iguales. Para el caso cuando la carga “R” aplicada es cero, la resistencia lateral “P” es:

$$P = \frac{0,5.\gamma.D.L^3.kp}{e + L}$$

Cuando la carga lateral “P” es cero:

$$R = \frac{0,5.\gamma.D.L^3.kp}{a}$$

En el análisis anterior se ha asumido que el momento máximo generado en el pilote es menor que el momento último que produce la rotura de la sección del pilote.

La resistencia lateral última adimensional $P / kp.\gamma.D^3$ se ha graficado en función de la longitud adimensional “L/D” en la figura 61.

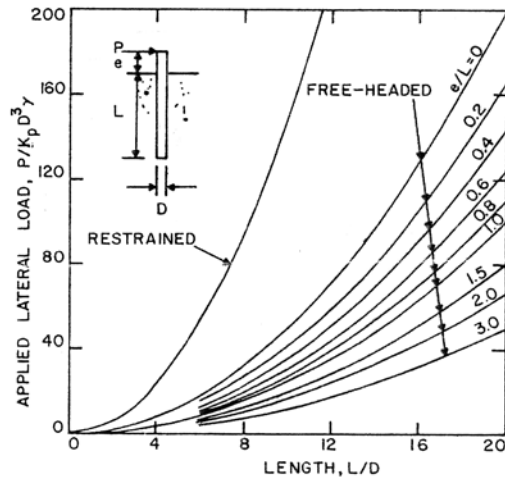


Figura 61. Resistencia lateral última – Pilote Corto (After: Broms, B., 1964)

- Pilote largo libre en la cabeza

La forma de falla se muestra en la figura 62 y se produce cuando se forma una rótula plástica a una distancia "f" por debajo de la superficie del suelo.

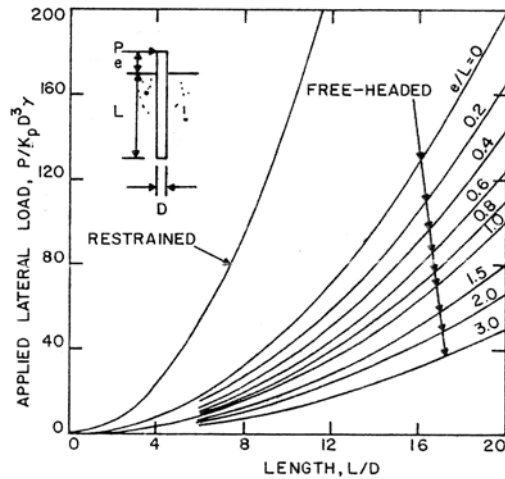


Figura 62. Pilote largo libre en su cabeza – Distribución de deflexiones, reacciones del suelo y momentos (After: Broms, B., 1964)

El momento máximo a una distancia "f" puede evaluarse si se asume que el empuje pasivo del suelo se desarrolla desde la superficie del suelo hasta la profundidad donde se produce el momento máximo. La distancia "f" puede determinarse considerando que la fuerza de corte a la profundidad "f" es cero:

$$f = 0,82 \sqrt{\frac{P}{\gamma \cdot D \cdot k_p}}$$

El momento máximo correspondiente puede determinarse con la siguiente fórmula:

$$M_{\max} = P(e + 0,67 \cdot f) + Qa$$

La falla se produce cuando el momento máximo se hace igual al momento último de la sección del pilote.

Para el caso en que la carga “Q” aplicada es cero, la resistencia lateral última “P” puede evaluarse con la siguiente fórmula:

$$P = \frac{M_{yield}}{e + 0,54 \sqrt{\frac{P}{\gamma \cdot D \cdot k_p}}}$$

La resistencia lateral última adimensional $P/k_p \cdot \gamma \cdot D^3$ se ha dibujado en la figura 63 en función del momento último adimensional $M_{yield}/D^4 \cdot \gamma \cdot k_p$ y la excentricidad e/D .

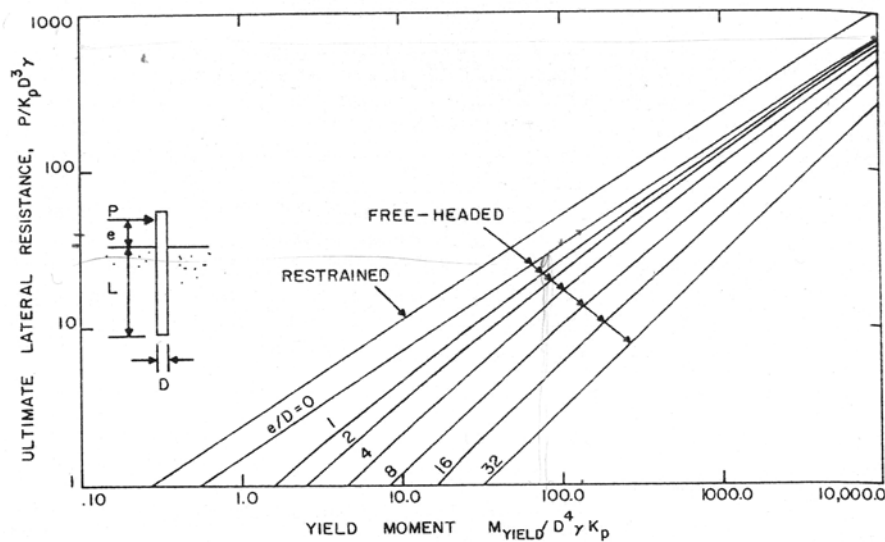


Figura 63. Pilote largo libre en su cabeza – Distribución de deflexiones, reacciones del suelo y momentos (After: Broms, B 1964)

Puede observarse claramente como la resistencia lateral última aumenta rápidamente con el incremento del momento último de la sección del pilote.

Método de Meyerhof

Meyerhof (1955) también divide los pilotes en cortos y largos y los analiza en suelos granulares y cohesivos

De acuerdo con este método (1995) un pilote es flexible si

$$K_r = \text{rigidez relativa del pilote} = \frac{E_p I_p}{E_s L^4} < 0,01$$

E_s = módulo de elasticidad horizontal promedio del suelo

Para pilotes cortos en arena la resistencia por carga última es

$$Q_{u(g)} = 0,12\gamma DL^2 K_{br} \leq 0,4 p_l DL$$

γ = peso específico del suelo

K_{br} = coeficiente de presión neta resultante del suelo

p_l = presión límite obtenida en pruebas de presurímetros

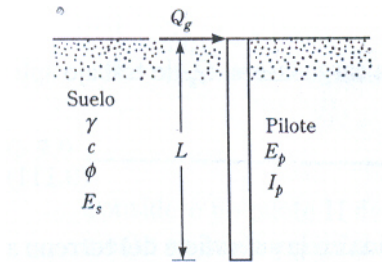


Figura 64. Pilote con carga lateral al nivel del terreno. (After: Das, B., 2001).

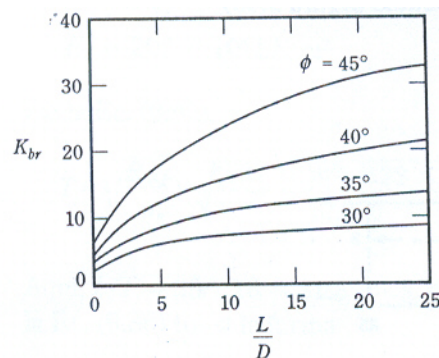


Figura 65. Variación del coeficiente K_{br} de la presión neta resultante del suelo. (After: Das, B., 2001).

El momento máximo es

$$M_{m\acute{a}x} = 0,35Q_{u(g)}L \leq M_y$$

Siendo " M_y " el Momento Ultimo del pilote

En el caso de pilotes largos para el cálculo de " $Q_{u(g)}$ " se sustituye " L " por una longitud efectiva " L_e "

$$\frac{L_e}{L} = 1,65K_r^{0,12} \leq 1$$

El momento máximo en el pilote flexible viene dado por

$$M_{m\acute{a}x} = 0,3K^{0,2}Q_gL \leq 0,3Q_gL$$

Para pilotes en arcilla la carga lateral última es

$$Q_{u(g)} = 0,4c_uK_{cr}DL \leq 0,4p_lDL$$

p_l = presión límite de prueba del presurómetro

K_{cr} = coeficiente de presión neta del suelo

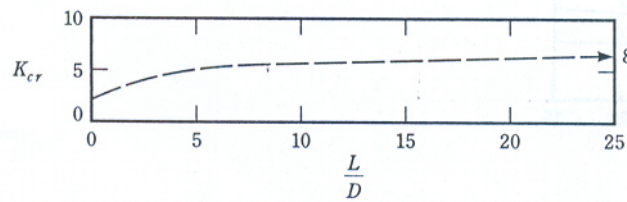


Figura 66. Variación de K_{cr} . (After: Das, B., 2001).

El momento flexionante máximo es

$$M_{m\acute{a}x} = 0,22Q_{u(g)}L \leq M_y$$

Para pilotes largos se utiliza la longitud efectiva en lugar de "L"

$$\frac{L_e}{L} = 1,5K_r^{0,12} \leq 1$$

El momento máximo en un pilote flexible es

$$M_{m\acute{a}x} = 0,3K^{0,2}Q_gL \leq 0,15Q_gL$$

REFERENCIAS

1. Hachich, W. et al editores "Fundacoes teoría e prática" - Ed. Pini – Brasil, 1999
2. Das, B. M. "Principios de Ingeniería de Cimentaciones" – E. Thomson - Mexico, 2001
3. Jimenes Salas, J. et al "Geotecnia y cimientos III" - Ed. Rueda – España, 1980.
4. Cestelli Guidi, C. et al. "Geotecnia técnica delle fondazioni" – Ed. Hoepli – Italia, 1980
5. Cátedra de Geotecnia III - Apunte Teórico Práctico" - U.N.C. - 2000
6. Rodriguez Ortiz, J.M. et al "Curso aplicado de cimentaciones" - COAM - 1980
7. Terzaghi, K. Peck R. Mesri, G. "Soil Mechanics in engineering practice" - Ed. J. Wiley - 1996
8. Delgado Vargas, M. "Ingeniería de cimentaciones" - Ed. Alfaomega - 1999
9. Da Costa Nunes, A. "Curso de mecánica dos solos e fundacoes" Ed. Globo - 1956
10. Saran, S. "Analysis and design of substructures" - Ed. Balkema – 1996
11. Terzariol, R. et al "Correlación de los ensayos de penetración SPT, CPT y DPSH para distintos tipos de suelos de la República Argentina" – Memorias del XVII CAMSIG – SINERGIA 2004 – Córdoba, Argentina – 2004
12. Terzariol, R. "Apuntes del curso de Geotecnia III" – Universidad Nacional de Córdoba, 2006.
13. Bosio, J. J., Viera Verzi, R.E. "The penetration index for the control of piles in hard soils" – Proceedings of the XII PCSMGE – SARA 2003 – Boston, Mass. EEUU – 2003
14. Bosio, J.J. "Caracterización de las areniscas friables de asunción mediante mediciones de penetración" – Proceedings of the IX PCSMGE – Santiago, Chile – 1991
15. Zang, L. y Einstein, H. "End bearing capacity of drilled shafts in rock" Journ of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE – EEUU, 1998
16. Hoek, E., "Strenght of rock and rock masses" International Society of Rock Mechanics-News, col. 2 p. 4-16 – EEUU – 1994.
17. Terzariol, R. et al "Determinación del coeficiente de reacción horizontal para

el diseño de pilotes en suelos colapsables”. Congreso Argentino de Geotecnia (CAMSIG). Coautor con Rivas y Ravena. San Juan, Argentina, 2006.

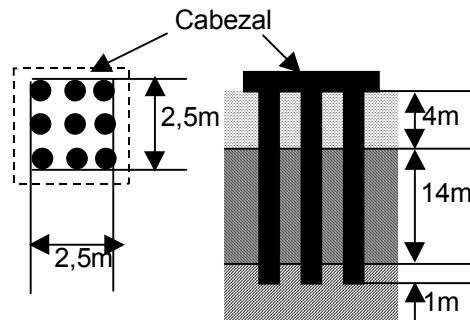
18. Redolfi, E. et al “Comportamiento de pilotes en suelos colapsables con ascenso del nivel freático”. Congreso Argentino de Geotecnia (CAMSIG). Coautor con J. Gomez. San Juan, Argentina, 2006.

ANEXO

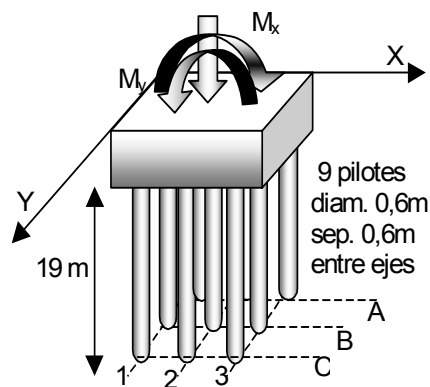
DE EJERCITACIONES

A.- GRUPO DE PILOTES Y ASENTAMIENTOS

A.1.- Determinar la carga admisible del grupo de pilotes excavados de 60 cm de diámetro, indicado en la figura, sabiendo que las características del suelo son las indicadas en la tabla III de Trabajo Práctico 6.



A.2.- En el mismo grupo de pilotes de la figura anterior calcular la carga que tomará cada pilote si sobre el cabezal actúan 2 momentos flectores $M_x = M_y = 250 \text{ tm}$ y una carga vertical de compresión $N = 270 \text{ t}$.



RESOLUCIÓN

A.1. Efecto de grupo en pilotes

Capacidad de un pilote individual

Capacidad friccional:

Estrato I (Fricción negativa)

$$q_{f1} = -(1,0,5 + 0) = -0,5t / m^2$$

Estrato II

$$q_{f2} = 1,1,2 + [(0,8,4 + 0,5 \cdot (1,9 - 1,0) \cdot 14) \cdot 0,70 \cdot 0,12] \cong 2,0t / m^2$$

$$q_{f2adm} \cong 1,5t / m^2$$

Capacidad de punta (Estrato de arcilla cementada)

$$q_{pu} = 9.Cu = 9.18 = 162t / m^2$$

$$q_{p adm} = \frac{162}{4} \cong 40t / m^2$$

Peso propio

$$Pp = 2,4 \cdot \pi \cdot \frac{0,6^2}{4} \cdot 19 \cong 13t$$

Capacidad admisible individual

$$Q_{adm} = -\pi \cdot 0,6 \cdot 4,0 \cdot 0,5 + \pi \cdot 0,6 \cdot 14,0 \cdot 0,15 + \pi \cdot \frac{0,6^2}{4} \cdot 40 - 13 \cong 34t$$

Capacidad de grupo

Recordar que:

$$Q_g = (2 \cdot (a + b)) \sum_{i=1}^n z_i \cdot q_{fi} + q_p \cdot a \cdot b - Pp \cdot \eta - ((a \cdot b) - \eta \cdot \Omega_p) \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot z_i$$

Siendo:

- a y b = lados del prisma envolvente de los pilotes
- z_i = espesor de los estratos atravesados
- γ_i = peso unitario de los estratos atravesados
- η = número de pilotes
- Pp = peso propio de los pilotes
- Ω_p = área de cada pilote

$$(a \cdot b) - \eta \cdot \Omega_p = 3,0 \cdot 3,0 - 9 \cdot 0,28 = 6,48m^2$$

$$Q_g = (2 \cdot (2,5 + 2,5)) \cdot (-0,5 \cdot 4,0 + 1,5 \cdot 14,0) + 40 \cdot 2,5^2 - 13 \cdot 0,9 - 6,48 \cdot (0,8 \cdot 4,0 + 0,9 \cdot 14,0) = 220t$$

$$Q_g = 220t < \eta \cdot Q_{pi} = 9 \cdot 34 = 306t$$

Conclusión: Por el efecto de grupo la capacidad del conjunto es inferior a la sumatoria de las capacidades individuales.

A.2. Distribución de esfuerzos en grupo de pilotes

Recordar que simplifícadamente:

$$Q_{pi} = \frac{N}{\eta} \pm \frac{M_x \cdot x_i}{\sum x_i^2} \pm \frac{M_y \cdot y_i}{\sum y_i^2}$$

Siendo:

- $x_i = 1,5$ m (distancia de cada pilote al punto de paso de la resultante N)
- $\eta = \text{número de pilotes} = 9$

Para simplificar se realizará la siguiente tabla.

Pilote	x_i m	y_i m	Σx_i^2	Σy_i^2	N/η t	$\pm M_x/\Sigma x_i^2$	$\pm M_y/\Sigma y_i^2$	Q_{pi} t
A-1	0,95	0,95	5,4	5,4	30,0	$\pm 46,3$	$\pm 46,3$	-57,9
A-2	0	0,95						-13,9
A-3	0,95	0,95						30,0
B-1	0,95	0						-13,9
B-2	0	0						30,0
B-3	0,95	0						73,9
C-1	0,95	0,95						30,0
C-2	0	0,95						73,9
C-3	0,95	0,95						117,9

B.- PILOTES EN SUELOS COLAPSABLES

Determinar la deformación adicional que se producirá en un pilote cargado con 60t, excavado en suelo colapsable de 40 cm de diámetro y apoyado sobre arena, a medida que el suelo lateral se humedece por la pérdida de una cañería (ver figura). Los parámetros para el suelo a humedad natural y humedecido son los indicados en la tabla I. En la figura 1 se muestra la curva carga-asentamiento de un ensayo realizado sobre la arena inferior. Despreciar el peso propio del pilote.

TABLA I

Estrato	γ (t/m ³)	ϕ (°)	C (t/m ²)	N _{SPT} (golpes)
Limo arenoso	1,5	20	2,0	--
Limo saturado	1,8	10	0,8	--

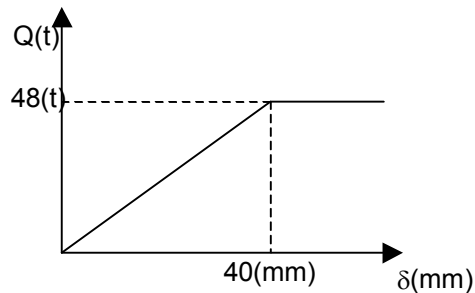
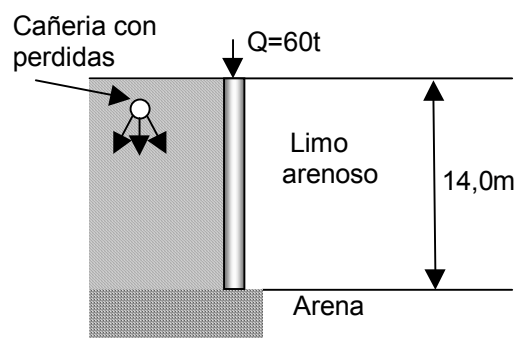


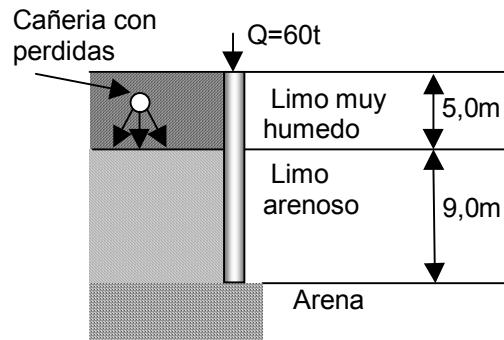
Figura 1

Se analizarán tres situaciones

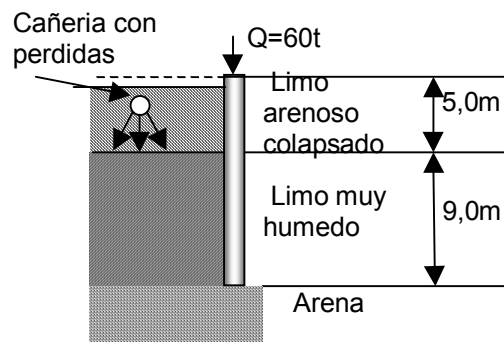
1. Suelo a humedad natural



2. Suelo humedecido hasta -5,00 metros



3. Suelo colapsado los primeros 5,00 metros y humedecido hasta -14,00 metros



RESOLUCION:

Capacidad friccional:

Recordar que:

$$q_{f(n)} = \alpha \cdot C + \left[\left(\sum_{i=1}^{i=n-1} \gamma_i \cdot z_i + 0,5 \cdot \gamma_n \cdot z_n \right) K_{an} \cdot \text{tg } \delta_n \right]$$

Siendo:

- q_{fn} = capacidad friccional unitaria última del estrato "n"
- α = coeficiente de adherencia
- C = cohesión
- γ_i = peso unitario sumergido del estrato "i" = $\gamma - \gamma_w$
- z_i = espesor del estrato "i"
- K_{an} = coef. de empuje activo del estrato "n" = $\text{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi_n}{2} \right)$
- δ_n = ángulo de fricción suelo-pilote = $0,66 \cdot \varphi_n$
- v = coeficiente de seguridad = 1,3

Suelo a humedad natural (0 a -14,0 m)

$$q_{f1} = 1,2,0 + 0,5 \cdot 1,5 \cdot 14,0 \cdot 0,49 \cdot 0,23 = 3,18t / m^2$$

Suelo a humedad natural debajo de suelo humedecido

$$q_{f2} = 1,2,0 + [(1,8 \cdot 5,0 + 0,5 \cdot 1,5 \cdot 9,0) \cdot 0,49 \cdot 0,23] = 3,77t / m^2$$

Suelo muy humedecido o saturado (0 a -5,0 m)

$$q_{f3} = 1.0,8 + 0,5.5.0.1,8.0,70.0,12 = 1,18t / m^2$$

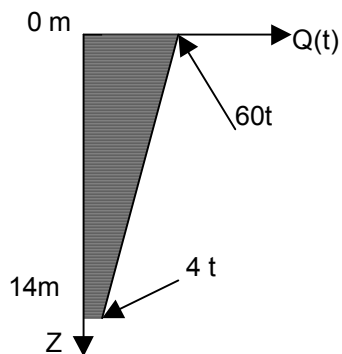
Suelo muy humedecido o saturado (-5,0 a -14,0 m)

$$q_{f4} = 1.0,8 + [((1,8.5,0 + 0,5.1,8.9,0)).0,70.0,12] = 2,23t / m^2$$

1.- Suelo a humedad natural

La carga en la punta será:

$$Q_b = 60 - 0,4.\pi.14.0.3,18 \cong 4,0t$$



Esto implica un deformación $\delta = 3,5$ mm (según figura 1)

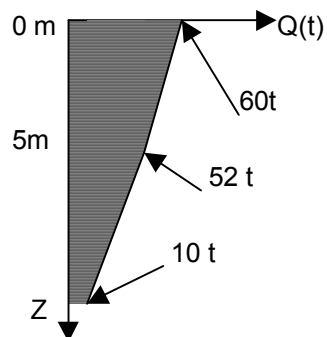
2.- Suelo humedecido entre 0 y -5 m, por debajo a humedad natural

La carga a - 5,00 m será:

$$Q_b = 60 - 0,4.\pi.5.0.1,18 \cong 52,5t$$

La carga en la punta será:

$$Q_b = 60 - 0,4.\pi.5.0.1,18 - 0,4.\pi.9.0.3,77 \cong 10,0t$$



Esto implica un deformación $\delta = 8,5$ mm (según figura 1)

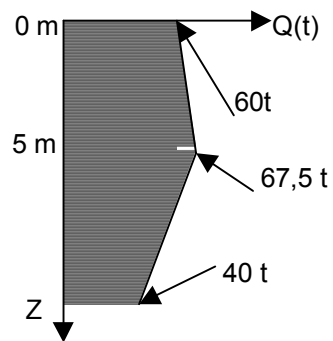
3.- Suelo colapsado entre 0 y -5 m, por debajo a humedecido fuertemente

La carga a - 5,00 m será:

$$Q_b = 60 + 0,4 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 0,1,18 \cong 67,5t$$

La carga en la punta será:

$$Q_b = 60 + 0,4 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 0,1,18 - 0,4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 0,2,23 \cong 40t$$



Esto implica un deformación $\delta = 33,5$ mm (según gráfico)

Conclusión:

El incremento de asentamiento es de $33,5 - 3,5$ mm = 30 mm. Evidentemente si esta deformación es diferencial puede provocar daños en la estructura apoyada sobre el pilote.

C. FUNDACIONES TRACCIONADAS Y SOMETIDAS A ESFUERZOS HORIZONTALES

Se desea verificar las fundaciones para el anclaje de las riendas de una torre de telefonía celular movil, inmersas en suelo poco cohesivo. Los esfuerzos máximos en la base de la rienda son:

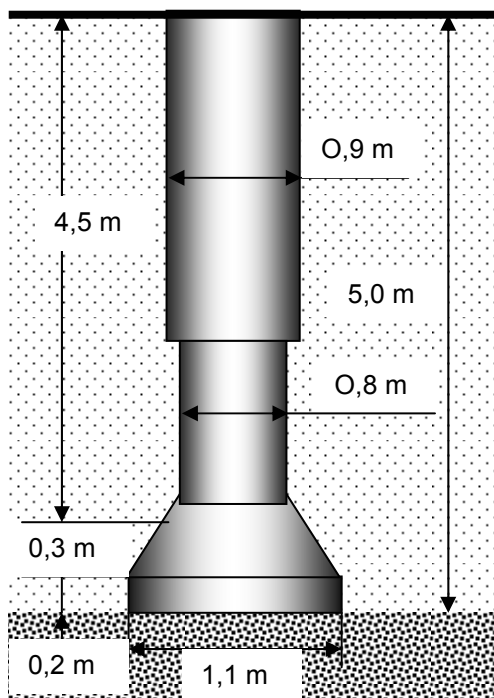
$$N_{\text{tracción}} = 14,0 \text{ t}$$

$$Q = 10,5 \text{ t}$$

De acuerdo a lo indicado en el estudio de suelos se considera un coeficiente de reacción lateral variable en profundidad con un valor de $K_h = 0,45 \times (Z/B)$ (kg/cm^3), e igual al coeficiente vertical en cada profundidad. Los restantes parámetros del suelo son $\gamma = 1,50 \text{ t/m}^3$, $\phi = 25^\circ$ y $c = 1,0 \text{ t/m}^2$. A una profundidad de -5,00 metros se fija una tensión admisible vertical de $25,00 \text{ t/m}^2$.

Se adopta un cilindro de fundación excavado y hormigonado in situ, con el mismo método constructivo antes indicado con las dimensiones que se indican en la figura.

1.- Verificación al arrancamiento



Peso propio del pozo:

$$\text{Vol fuste: } \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h_1 =$$

$$\frac{\pi \cdot 0,9^2}{4} \cdot 4,50 = 2,86 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol campana:}$$

$$0,2618 \cdot h (D^2 + d \cdot D + d^2)$$

$$= 0,2618 \cdot 0,30 (1,1^2 + 0,8 \cdot 1,1 + 0,8^2) = 0,21 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol cilindro: } \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h_2 = \frac{\pi \cdot 1,1^2}{4} \cdot 0,20 = 0,2 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{tot}} = \text{Vol fuste} + \text{Vol camp.} + \text{Vol cil.}$$

$$V_{\text{tot.}} = 3,27 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso propio} = 3,27 \cdot 2,2 = 7,19 \text{ t}$$

Capacidad última de levantamiento de pilas perforadas con campanas en arenas.

$$T_{un} = B_q \cdot A_p \cdot \gamma \cdot L$$

$$B_q = 2 \cdot \frac{L}{D_b} \cdot K'_u \cdot \text{tg} \phi \cdot \left(m \cdot \frac{L}{D_b} + 1 \right) + 1 \rightarrow B_q = 2 \cdot \frac{5}{1,1} \cdot 0,5 \cdot \text{tg} 25 \cdot \left(0,10 \cdot \frac{5}{1,10} + 1 \right) + 1 = 3,97$$

$$T_{un} = 3,97 \times 0,95 \times 1,5 \times 5,0 = 30,2 \rightarrow FS = \frac{T_{un}}{F_H} = \frac{30,2}{14,0} = 2,16$$

2. Verificación a fuerzas horizontales:

2.1. Determinación de esfuerzos

- a) Se calcula la presión horizontal máxima (p_1). Con ella se obtiene el empuje actuante contra el suelo (E_1) y se lo compara con el empuje resistente (E_p).

$$p = K_H \frac{z}{H} (h - z) \text{tg} \alpha \rightarrow p_1; p_2$$

- b) Formula de Momentos flectores a distintas profundidades.

$$M = Q(e + z) + \frac{Q \cdot e \cdot z^3}{H^4} \cdot (3z - 4H) + \frac{Q \cdot z^3}{H^3} \cdot (2z - 3H)$$

- c) Formula de esfuerzos de corte a distintas profundidades.

$$V_y = Q - \frac{12Qez^2}{H^4} \cdot (H - z) + \frac{Qz^2}{H^3} \cdot (8z - 9H)$$

- d) Fórmula de esfuerzo normal a distintas profundidades.

$$N_z = N - \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \gamma_H \cdot z$$

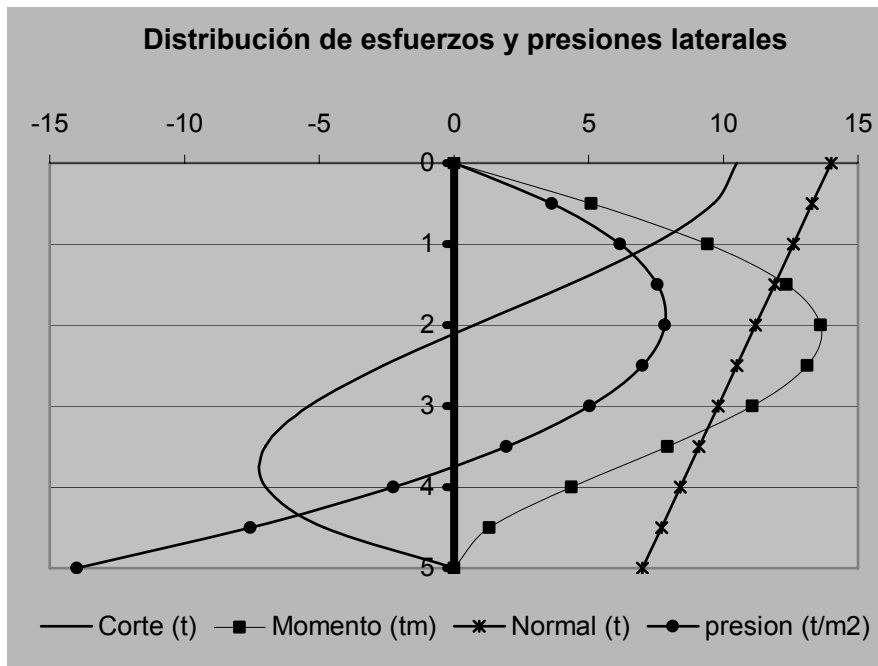
Tablas con Resultados.

Prof. (z) (m)	Qz(t)	Mz(tm)	Nz(t)	p(z) (t/m ²)
0	10.5	0	14	0
0.5	9.639	5.103	13.300565	3.64
1	7.392	9.408	12.60113	6.16
1.5	4.263	12.348	11.901695	7.56
2	0.756	13.608	11.20226	7.84
2.5	-2.625	13.125	10.502825	7
3	-5.376	11.088	9.80339	5.04
3.5	-6.993	7.938	9.103955	1.96
4	-6.972	4.368	8.40452	-2.24
4.5	-4.809	1.323	7.705085	-7.56
5	0	0	7.00565	-14

Tabla Resumen

Q(max)	N(max)	M(max)	p(max)
10.5 t	14 t	13.7 tm	7.9 t/m ²

a. Gráficos.



2.2. Verificaciones y dimensionado

a. Empuje Pasivo (E_p) que puede resistir el suelo mediante la teoría de Rankine.

$$E_{p1} = 0,5 \cdot K_p \cdot \gamma \cdot h^2 + 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_p} \cdot h$$

$$E_{pt} = 0,5 \cdot K_p \cdot \gamma \cdot H^2 + 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_p} \cdot H$$

$$E_{p2} = E_{pt} - E_{p1}$$

$$p_1 \Rightarrow E_1 \quad \text{y} \quad p_2 \Rightarrow E_2$$

$$v_1 = \frac{E_{p1}}{E_1} \quad \text{y} \quad v_2 = \frac{E_{p2}}{E_2}$$

Siendo

$$K_p = tg^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) = 2,46$$

$$\gamma = 1,5 \frac{t}{m^3}$$

$$H = 5,0m$$

$$c = 1,0 \frac{t}{m^2}$$

$$h = \frac{H}{2} \left(\frac{3H}{2H} \right)$$

$$E_{p1} = 0,5 \cdot K_p \cdot \gamma \cdot h^2 + 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_p} \cdot h = 0,5 \times 2,46 \times 1,5 \times 3,75^2 + 2 \times 1 \times \sqrt{2,46} \times 3,75 = 37,7t/m$$

$$E_{pt} = 0,5 \cdot K_p \cdot \gamma \cdot H^2 + 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_p} \cdot H = 0,5 \times 2,46 \times 1,5 \times 5,0^2 + 2 \times 1 \times \sqrt{2,46} \times 5,0 = 61,8t/m$$

$$E_{p2} = E_{pt} - E_{p1} = 61.8t - 37.7t = 24.1t / m$$

$$E_1 = 2 \left(\frac{2}{3} p_1 \frac{h}{2} \right) = 2 \left(\frac{2}{3} 7,84 \frac{3,75}{2} \right) = 19,6t / m$$

$$E_2 = p_2 \frac{(H-h)}{2} = 14,5 \frac{(5,0-3,75)}{2} = 9,06t / m$$

Coefficientes de Seguridad

$$v_1 = \frac{37,7}{19,6} = 1,9 \quad \text{y} \quad v_2 = \frac{24,1}{9,6} = 2,5$$

- b. Se determina el ángulo ($\text{tg } \alpha$) que gira el bloque bajo la acción del momento de vuelco y con ello el desplazamiento horizontal en la cabeza que debe ser menor que 1".

$$\text{tg } \alpha = \frac{12Q}{DH^3} \frac{(2H+3e)}{K_H}$$

Siendo:

$$K_H = 2500t / m^3$$

$$\text{tg } \alpha = \frac{12 \times 10,5}{0,9 \times 5,0^3} \frac{(2 \times 5,0)}{2500} = 0,00448$$

$$x_{\max} = h \cdot \text{tg } \alpha$$

$$x_{\max} = 3,75 \times 0,00448 = 1,68\text{cm} < 2,54\text{cm} \rightarrow \text{Verifica}$$

_____ 0 _____