

## **PILOTES DE CIMENTACIÓN**

### **MP-Geostru 2015**

#### **Carga Última vertical**

La carga límite vertical ha sido calculada con fórmulas estadísticas que expresan la misma en función de la geometría del pilote, de las características del terreno y de la conexión pilote-terreno. Al respecto, y ya que la realización de un pilote (sea este hincado o barrenado) modifica siempre las características del terreno alrededor del mismo, se propone asumir ángulo de resistencia al corte igual a:

$$\phi' = \frac{3}{4} \phi + 10^\circ \text{ En pilotes hincados}$$
$$\phi' = \phi - 3^\circ \text{ En pilotes barrenados}$$

Donde  $\phi$  es el ángulo de resistencia al corte antes de realizar el pilote. A continuación indicaremos con  $\phi$  el parámetro de resistencia seleccionado para fines de cálculo, la carga última  $Q_{lim}$  se subdivide convencionalmente en dos alícuotas, la resistencia en la punta  $Q_p$  e la resistencia lateral  $Q_l$ .

#### **Resistencia unitaria en la punta**

##### **Fórmula de Terzaghi**

La solución propuesta por Terzaghi asume que el terreno existente por encima de la profundidad alcanzada desde la punta del pilote puede ser sustituida por una sobrecarga equivalente igual a la tensión vertical eficaz (sin tener en cuenta el hecho que la interacción entre pilote y terreno de cimentación pueda modificar tal valor) y reconduce el análisis al problema de capacidad de carga de una cimentación superficial.

La fórmula de Terzaghi se puede escribir:

$$Q_p = c \times N_c \times s_c + \gamma \times L \times N_q + 0.5 \times \gamma \times D \times N_\gamma \times s_\gamma$$

Dónde:

$$N_q = \frac{a^2}{2 \cos^2(45 + \phi/2)}$$

$$a = e^{(0.75\pi - \phi/2) \tan \phi}$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi$$

$$N_\gamma = \frac{\tan \phi}{2} \left( \frac{K_{p\gamma}}{\cos^2 \phi} - 1 \right)$$

### **Método de Berezantzev**

Berezantzev hace referencia a una superficie de deslizamiento “tipo Terzaghi” que se detiene en el plano de cimentación (punta del pilote). Considera que el cilindro de terreno coaxial al pilote y con diámetro igual a la extensión en sección de la superficie de deslizamiento, está en parte “sostenido” por acción tangencial del terreno que queda a lo largo de la superficie lateral. Consigue un valor de la presión en la base inferior a  $\gamma D$ , y entre más pequeño es, más marcado es el “efecto silo”, o sea más grande la relación D/B. Esto lo toma en cuenta el coeficiente  $N_q$ , que por lo tanto es función decreciente de D/B.

La resistencia unitaria  $Q_p$  en la punta, en el caso de terreno con rozamiento ( $\phi$ ) y cohesión ( $c$ ), se da la expresión:

$$Q_p = c \times N_c + \gamma \times L \times N_q$$

Dónde:

$\gamma$  peso específico del terreno;

$L$  largo del pilote;

$N_c$  y  $N_q$  son los factores de capacidad de carga incluyendo el efecto forma (circular);

### **Método de Vesic**

Vesic ha asimilado el problema de la rotura entorno a la punta del pilote al de la expansión de una cavidad cilíndrica en un medio elástico-plástico. De tal manera toma en cuenta también la compresión del medio.

Según Vesic los coeficientes de capacidad portante  $N_q$  e  $N_c$  se pueden calcular como sigue:

$$N_q = \frac{3}{3 - \sin \phi} \left\{ \exp \left[ \left( \frac{\pi}{2} - \phi \right) \tan \phi \right] \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) I_{rr}^{(4 \sin \phi) / [3(1 + \sin \phi)]} \right\}$$

3

El índice de rigidez reducido  $I_{rr}$  en la expresión anterior se calcula a partir de la deformación volumétrica  $\varepsilon_v$ .

El índice de rigidez  $I_r$  se calcula utilizando el módulo de elasticidad tangencial  $G'$  y la resistencia al corte  $s$  del terreno.

Cuando hay condiciones sin drenaje o el suelo se encuentra en estado denso, el término  $\varepsilon_v$  se puede asumir igual a cero y se obtiene  $I_{rr} = I_r$

Se puede estimar  $I_r$  con los siguientes valores:

TERRENO	$I_r$
Arena	75-150
Limo	50-75
Arcilla	150-250

El término  $N_c$  de la capacidad portante se calcula:

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad (a)$$

Cuando  $\phi = 0$  (condiciones sin drenaje)

$$N_c = \frac{4}{3} (\ln I_{rr} + 1) + \frac{\pi}{2} + 1$$

### Método de Janbu

Janbu calcula  $N_q$  (con el ángulo  $\psi$  expresado en radianes) como sigue:

$$N_q = \left( \tan \phi + \sqrt{1 + \tan^2 \phi} \right)^2 \exp(2\psi \tan \phi)$$

$N_c$  se puede recavar de la (a) cuando  $\phi > 0$ .

Para  $\phi = 0$  se usa  $N_c = 5.74$

### Fórmula de Hansen

La fórmula de Hansen vale para cualquier relación D/B, o sea tanto para cimentaciones superficiales como profundas; pero el mismo autor introduce coeficientes para interpretar mejor el comportamiento real de la cimentación. De hecho sin los mismos habría un aumento demasiado fuerte de la carga última con la profundidad.

Para valores  $L/D > 1$ :

$$d_c = 1 + 0.4 \tan^{-1} \frac{L}{D}$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \tan^{-1} \frac{L}{D}$$

En el caso  $\phi = 0$

D/B	0	1	1.1	2	5	10	20	100
d' <sub>c</sub>	0	0.40	0.33	0.44	0.55	0.59	0.61	0.62

En los factores siguientes las expresiones con ápicos (') valen cuando  $\phi = 0$ .

Factor de forma:

$$s'_c = 0.2 \frac{D}{L}$$

$$s_c = 1 + \frac{N_q}{N_c} \frac{D}{L}$$

$$s_q = 1 + \frac{D}{L} \tan \phi$$

$$s_q = 1 + \frac{D}{L} \tan \phi$$

$$s_\gamma = 1 - 0.4 \frac{D}{L}$$

Factor de profundidad:

$$d'_c = 0.4k$$

$$d_c = 1 + 0.4k$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi) k$$

$$d_\gamma = 1 \text{ per qualsiasi } \kappa$$

$$k = \tan^{-1} \frac{L}{D} \text{ se } \frac{L}{D} > 1$$

5

### Resistencia del fuste

El método utilizado para calcular la capacidad de carga lateral es el método A, propuesto por Tomlinson (1971). La resistencia lateral se calcula de la siguiente manera:

$$Q_l = (\alpha c + \sigma K \tan \delta) \cdot A_l \cdot f_w$$

$A_l$  = superficie lateral del pilote;

$f_w$  = factor de corrección ligado a la tronco-conicidad del pilote, o sea la disminución porcentual del diámetro del pilote con

$c$  = valor medio de la cohesión (o de la resistencia al corte en condiciones no drenadas);

$\sigma$  = presión vertical eficaz del terreno;

$K$  = coeficiente de empuje horizontal, dependiente de la tecnología de ejecución del pilote y de anterior estado de densidad, se calcula como sigue:

Para pilotes hincados

$$K = 1 - \tan^2 \phi$$

O, en el caso específico, es posible asignar los siguientes valores propuestos en la tabla:

Pilote	K	
	Terreno suelto	Terreno denso
Acero	0.5	1
Hormigón Pref.	1	2
Madera	1	3

Para pilotes barrenados

$$K = 1 - \sin\phi$$

$\delta$  = ejecución del pilote y de anterior estado de densidad, se calcula como sigue:

Para pilotes hincados

$$\delta = 3/4 \tan\phi$$

Para pilotes barrenados

$$\delta = \tau \alpha \nu \phi$$

$\alpha$  = coeficiente de adherencia que se obtiene como a continuación:

### Pilotes barrenados:

*Caquot – Kerisel* 
$$\alpha = \frac{100 + c^2}{100 + 7c^2}$$

*Meyerhof – Murdock (1963)* 
$$\alpha = 1 - 0.1 \cdot c \text{ para } c < 5 \text{ t/m}^2$$
  

$$\alpha = 0.525 - 0.005 \cdot c \text{ Para } c \geq 5 \text{ t/m}^2$$

*Whitaker – Cooke (1966)* 
$$\alpha = 0.9 \text{ Para } c < 2.5 \text{ t/m}^2$$
  

$$\alpha = 0.8 \text{ para } 2.5 \leq c < 5 \text{ t/m}^2$$
  

$$\alpha = 0.6 \text{ para } 5 \leq c \leq 7.5 \text{ t/m}^2$$
  

$$\alpha = 0.9 \text{ para } c > 7.5 \text{ t/m}^2$$

*Woodward (1961)* 
$$\alpha = 0.9 \text{ para } c < 4 \text{ t/m}^2$$
  

$$\alpha = 0.6 \text{ para } 4 \leq c < 8 \text{ t/m}^2$$
  

$$\alpha = 0.5 \text{ para } 8 \leq c < 12 \text{ t/m}^2$$
  

$$\alpha = 0.4 \text{ para } 12 \leq c \leq 20 \text{ t/m}^2$$
  

$$\alpha = 0.20 \text{ para } c > 20 \text{ t/m}^2$$

### Pilotes hincados

Coeficiente $\alpha$ para pilotes hincados	
$2.5 \leq c < 5 \text{ t/m}^2$	$\alpha = 1.00$
$5 \leq c < 10$	$\alpha = 0.70$
$10 \leq c < 15$	$\alpha = 0.50$
$15 \leq c < 20$	$\alpha = 0.40$
$c \geq 20$	$\alpha = 0.30$

## Rozamiento negativo

Cuando se hince un Pilote o pasa a través de un estrato de material comprimible antes de terminar el proceso de consolidación, el terreno se moverá con respecto al pilote produciendo esfuerzos de roce entre pilote y terreno que inducen al llamado fenómeno de rozamiento negativo.

El rozamiento aumenta la carga axial en el pilote, con la consecuencia del aumento del asiento debido al acortamiento elástico del mismo como efecto del aumento de la carga. La fuerza que nace como efecto del rozamiento negativo se estima igual al componente de roce de la resistencia lateral (ver Resistencia del fuste) a lo largo de la superficie lateral en contacto con el estrato donde se genera tal fenómeno, pero del lado opuesto al rozamiento positivo. El resultado así determinado no se detrae de la carga límite, sino de la de ejercicio.

## Factor de corrección sísmica

### Criterio de Vesic

Según este autor, para tener en cuenta el fenómeno de la dilatación en el cálculo de la capacidad de carga es suficiente disminuir en 2° el ángulo de rozamiento de los estratos de cimentación. La limitación de esta sugerencia está en el hecho que no toma en cuenta la intensidad de la sollicitación sísmica (expresada por medio del parámetro de la aceleración sísmica horizontal máxima). Sin embargo este criterio parece confirmarse en las observaciones hechas con ocasión de diferentes eventos sísmicos.

### Criterio de Sano

El autor propone disminuir el ángulo de rozamiento de los estratos portantes en una cantidad dada por la relación:

$$D_p = \arctg\left(\frac{A_{\max}}{\sqrt{2}}\right)$$

Donde  $A_{\max}$  es la aceleración sísmica horizontal máxima.

Este criterio, con respecto al de Vesic, tiene la ventaja de considerar la intensidad de la sollicitación sísmica. No obstante la experiencia demuestra que la aplicación acrítica de esta relación puede conducir a valores excesivamente cautelosos de  $Q_{lim}$ .

Las correcciones de Sano y de Vesic se aplican exclusivamente a terrenos incoherentes muy densos. Es errado aplicarlas a terrenos sueltos medianamente densos, donde las vibraciones sísmicas producen el fenómeno opuesto al de la dilatación, con aumento del grado de densidad y del ángulo de rozamiento

## ASIENTOS

El asentamiento vertical ha sido calculado con el método de Davis-Poulos, según el cual el pilote se considera rígido (indeformable) inmerso en un medio elástico, semiespacio o estrato de espesor finito.

Se hace la hipótesis de que la interacción pilote-terreno sea constante en trectos en  $n$  superficies cilíndricas en las que se divide la superficie lateral del pilote.

El asiento de la superficie genérica  $i$  por efecto de la carga transmitida del pilote al terreno en la superficie  $j$ -ésima se puede expresar:

$$W_{i,j} = (\tau_j / E) \times B \times I_{i,j}$$

Dónde:

$\tau_j$  = Incremento de tensión relativo al punto medio de la franja

$E$  = Módulo elástico del terreno

$B$  = Diámetro del pilote

$I_{i,j}$  = Coeficiente de influencia

El asiento se obtiene sumando  $W_{i,j}$  para todas las  $j$  áreas.

## CARGA ÚLTIMA HORIZONTAL

La carga última horizontal se calcula según la teoría de Broms, el cual asume que el comportamiento de la conexión pilote-terreno sea de tipo rígido perfectamente plástico, y que por lo tanto la resistencia del terreno se moviliza enteramente para un valor cualquiera nulo del movimiento y permanece constante cuando crece el movimiento.

Se asume que el comportamiento flexional del pilote sea de tipo rígido-perfectamente plástico, vale a decir que las rotaciones elásticas del pilote se pueden obviar hasta que el momento de flexión no alcance el valor  $M_y$  de plastificación.

Para los terrenos cohesivos Broms propone adoptar una reacción del terreno constante con la profundidad igual a:

$$p = 9 \times c_u \times B$$

Con reacción nula hasta la profundidad de 1.5  $d$ ; indicando con:

$C_u$  = Cohesión no drenada,



$B$  = Diámetro del pilote,

$p$  = Reacción del terreno por unidad de longitud del pilote.

Para los terrenos incoherentes se asume que la resistencia varíe linealmente con la profundidad según la ley:

$$p = 3K_p \gamma zB$$

Dónde:

$p$  = Reacción del terreno por unidad de longitud del pilote;

$K_p$  = Coeficiente de empuje pasivo;

$\gamma$  = Peso por unidad de volumen del terreno;

$z$  = Profundidad;

$B$  = Diámetro del pilote.

### Pilote en condiciones de ejercicio

Análisis del pilote en condiciones de ejercicio: **Método de los elementos finitos.**

El método de los elementos finitos modela el micro pilote / pilote de cimentación, sujeto a cargas transversales, en modo real ya que usa tanto los movimientos como las rotaciones de los nudos para definir la línea elástica del micro pilote, por lo tanto representa el método más razonable y eficaz actualmente disponible para analizar este tipo de estructuras.

A continuación se hace mención de los fundamentos teóricos del método indicando con  $P$  la matriz de las fuerzas externas de los nudos, con  $F$  la de las fuerzas internas y con  $A$  la matriz de los coeficientes de influencia que, para el equilibrio entre fuerzas externas e internas, une las primeras dos según la forma:

$$P = AF$$

Los movimientos internos  $e$  (traslaciones y rotaciones) del elemento en el nudo genérico están relacionados a los movimientos externos  $X$  (traslaciones y rotaciones) aplicados a nudos, en la siguiente relación:

$$e = BX$$

Donde la matriz  $B$  ha demostrado ser la traspuesta de la matriz  $A$ .

Por otra parte, las fuerzas internas  $F$  están ligadas a los movimientos internos  $e$  en la siguiente expresión:

$$F = Se$$

Aplicando las habituales sustituciones, se obtiene:

$$\mathbf{F} = \mathbf{SATX}$$

Y por lo tanto

$$\mathbf{P} = \mathbf{AF} = \mathbf{A SATX}$$

10

Por consiguiente, calculando el inverso de la **matriz A SAT** se obtiene la expresión de los movimientos externos X:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A SAT})^{-1}\mathbf{P}$$

Conocidos los movimientos **X** es posible recavar las fuerzas internas **F** necesarias para el proyecto de la estructura.

La matriz **A SAT** es conocida como matriz de rigidez global en cuanto caracteriza el legaren entre movimientos y fuerzas externas húngales.

El método de elementos finitos tiene, entre otras, la ventaja de permitir tomar en cuenta, como condiciones del contorno, rotaciones y movimientos conocidos.

Las reacciones húngales de los muelles que esquematizan el terreno se consideran como fuerzas globales ligadas al módulo de reacción y al área de influencia del nudo. En la solución de elementos finitos para micro pilotes / pilotes sujetos a cargas trasversales, el módulo de reacción se considera e la siguiente fórmula:

$$k_s = A_s + B_s Z^n$$

O, no queriendo hacer crecer ilimitadamente el  $k_s$  con la profundidad, en la fórmula:

$$k_s = A_s + B_s \tan^{-1}(Z/B)$$

En la cual  $Z$  es la profundidad y  $B$  es el diámetro del pilote / micro pilote.

Los valores de  $A_s$  y  $B_s Z^n$  se obtienen de la expresión de la capacidad portante (Bowles) con factores correctivos  $\alpha$ ,  $\beta$ , y  $\gamma$  igual a 1:

$$k_s = q_{ult}/\Delta H = C(cN_c + 0.5\gamma B N_\gamma)$$

$$B_s Z^n = C(\gamma N_q Z^1)$$

Donde  $C = 40$  se obtiene en correspondencia de un asentamiento máximo de 25 mm.

## Datos generales

=====

Diámetro punta 0,20 m  
Longitud 5,00 m  
Tipo Barrenados  
Capacidad portante por la punta calculada con: Terzaghi  
Profundidad nivel freático desde plano del terreno 0,00 m  
Hormigón tipo 1  
Acero tipo 1

11

## Estratigrafía

Nr.: Número del estrato Hs: Espesor del estrato. Fi: Angulo de rozamiento. c: Cohesión  
Alfa: Coeficiente de adhesión del rozamiento lateral en el fuste. Vs: Velocidad ondas de corte.

### Strat. 1

Nr.	Hs	Peso específico [kN/m³]	Peso específico saturado [kN/m³]	c [kN/m²]	Fi (°)	Rozamiento negativo	Alfa	Módulo elástico [MN/m²]
1	2,00	14,00	14,50	10,00	0,00	No	0,94	2,00
2	15,00	16,90	17,50	35,00	0,00	No	0,60	5,20

## Carga última

Estratigrafía	Nq	Nc	Fi/C estrato punta Pilote (°)/[kN/m²]	Peso pilote [kN]	Carga última por punta [kN]	Carga última lateral [kN]	Carga última [kN]	Rozamiento negativo [kN]	Carga última horizontal [kN]
A1+M1+R3	1,00	5,71	0/35,00	3,93	8,84	51,16	56,07	--	--

## RESISTENCIA DE PROYECTO CARGAS AXIALES

=====

Resistencia característica cargas axiales. Nombres combinación: A1+M1+R3

=====

Número de verticales examinadas 1  
Factor correlación vertical examinada promedio (xi3) 1,00  
Factor correlación vertical examinada mínima (xi4) 1,00

	Rc, Min [kN]	Rc, Media [kN]	Rc, Max [kN]
Base	8,84	8,84	8,84
Lateral	51,16	51,16	51,16
Total	56,07	56,07	56,07

Coeficiente parcial resistencia característica

R3

Base

3,00

Lateral

1,50

Resistencia de proyecto base

2,95 kN

Resistencia de proyecto lateral

34,11 kN

Resistencia de proyecto

33,13 kN