

LOS PILOTES PASIVOS EN ESTABILIZACIÓN DE TALUDES

J. IGNACIO GRAU
IBERINSA

RESUMEN

Se estudia el efecto de inclusiones rígidas (pilotes pasivos) sobre la estabilidad de taludes, efectuando un examen crítico de las diversas teorías existentes sobre la interacción entre dichos elementos y el terreno. De dicho examen se deduce que el mecanismo de interacción puede ser en la realidad muy diferente según los casos, lo que explica la diversidad de teorías. Depende de la definición de los pilotes, su dirección, y relación entre sus dimensiones transversales y los vanos, y puede cambiar, además, durante el proceso de deformación del talud, aparte de que también se modifica el grado de sollicitación de los elementos de la resistencia. Se llega, con todo, a criterios de aplicación práctica para los casos típicos, desde la óptica de las estructuras de ribera.

1. INTRODUCCION

Entendemos por pilotes pasivos inclusiones rígidas que se introducen en el terreno con el fin de aumentar sus características resistentes y disminuir sus deformaciones.

Vamos a analizar a continuación el uso de los pilotes pasivos para estabilizar taludes y no contemplaremos otros usos como pueden ser la mejora de la capacidad portante del terreno o la disminución de asentamientos.

La acción estabilizadora de los pilotes pasivos se ejerce a través de dos mecanismos diferentes. Por una parte el pilote (fig. 1) trabajando a esfuerzos axiales ejerce una acción estabilizadora tomando cargas de talud bien por rozamiento negativo a lo largo de su fuste o bien directamente por su cabeza si hemos dispuesto los elementos transmisores necesarios. Por otra parte (fig. 2) los pilotes ofrecen resistencia a que el terreno fluya entre ellos ejerciendo una reacción lateral sobre el mismo que tiende a estabilizarlo. En este último caso el pilote en la mayoría de los casos trabajará simultáneamente a flexión y esfuerzos cortante.

Por tanto para cuantificar la acción estabilizadora de los pilotes sobre el talud es imprescindible

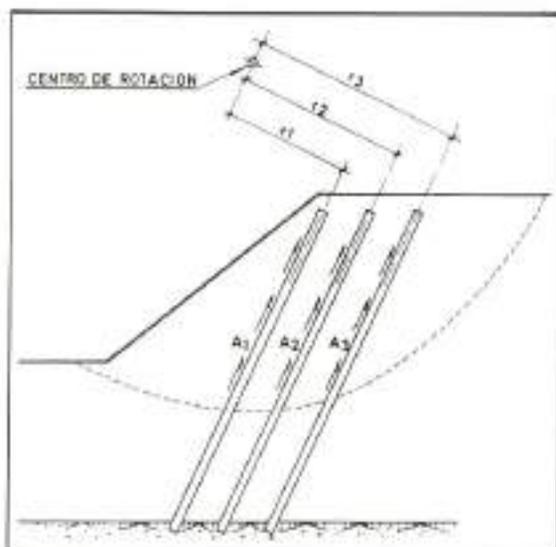


FIGURA 1

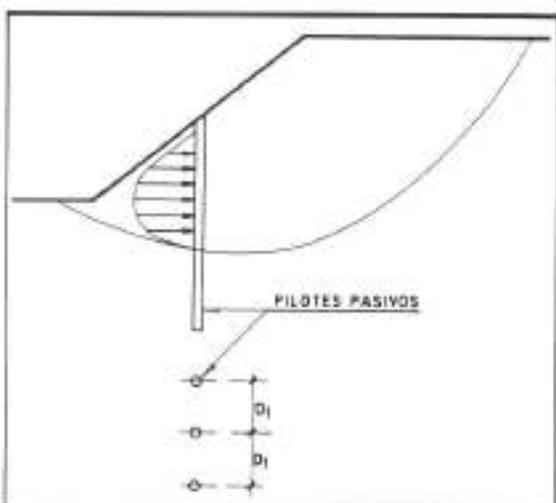


FIGURA 2

la determinación de las fuerzas correspondientes a la acción mutua pilotes-terreno.

Fijadas estas fuerzas estamos en condiciones de estudiar las nuevas condiciones de estabilidad del talud por medio de cualquier método de los usualmente empleados en los estudios de estabilidad.

Por fin habrá que comprobar que cada pilote estructuralmente es capaz de resistir, con unas condiciones de apoyo determinadas, las cargas iguales y contrarias a las que él ejerce sobre el talud.

2. FUERZAS ACTUANTES EN LOS PILOTES PASIVOS.

Estudiaremos por separado las dos formas de interacción pilote-terreno.

2.1. INTERACCION QUE PRODUCE ESFUERZOS AXILES EN LOS PILOTES.

Según lo indicado por BROMS en su libro "PRE-CAST PILING PRACTICE" podemos distinguir los siguiente casos:

2.1.1. Si los pilotes se han hincado a través de una capa de arcilla blanda hasta llegar a una capa de alta capacidad portante (arena, grava, etc.) las cargas axiles por rozamiento negativo (fig. 1) valen:

$$F1 = A1 \times Ca, F2 = A2 \times Ca, \text{ etc.}$$

donde Ca es la adhesión del terreno con los pilotes en la parte superior a la superficie de deslizamiento estudiada y $A1, A2, \text{ etc.}$ es el área lateral del pilote en la misma zona. El momento estabilizador de estos esfuerzos tiene por expresión:

$$M \text{ est} = Ca (A1 \times r1 + A2 \times r2 + \dots + An \times rn)$$

2.1.2. Si los pilotes son cortos y no llegan por su punta hasta terreno firme entonces las fuerzas de rozamiento negativo que entran en juego son las que quedan por debajo de la superficie de deslizamiento supuesta, tal como se ilustra en la Fig. 3.

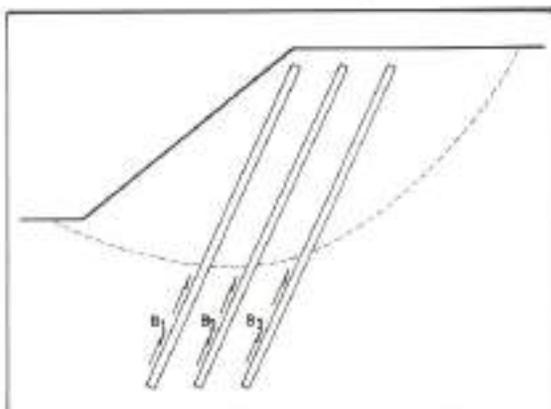


FIGURA 3

El momento estabilizador tendrá por expresión $M \text{ est} = Ca \times (B1 \times r1 + B2 \times r2 + \dots + Bn \times rn)$ donde $B1, B2, \dots, Bn$ son en este caso las áreas laterales de los pilotes bajo la superficie de deslizamiento.

2.1.3. Un caso en que los pilotes toman cargas axiles a través de su cabeza y fuste simultáneamente, es el que se ilustra en las figuras 4 y 5, en donde los pilotes se han empleado para aumentar la estabilidad de un talud sobre el que se realiza un relleno. En la fig. 4 se ha supuesto que la punta de los pilotes llega hasta terreno firme y en la fig. 5

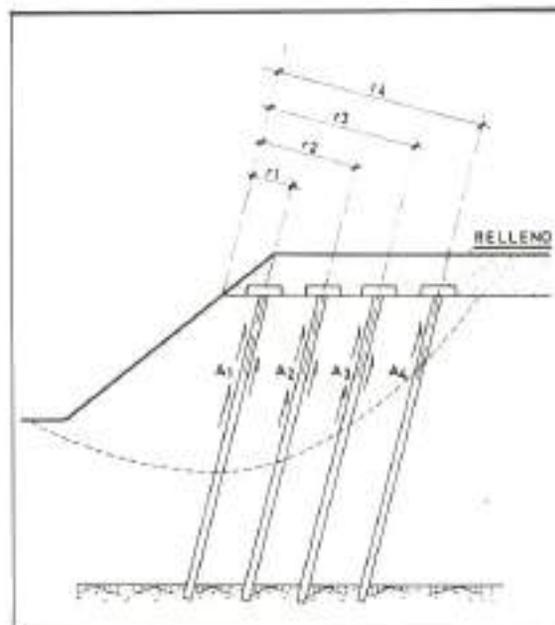


FIGURA 4

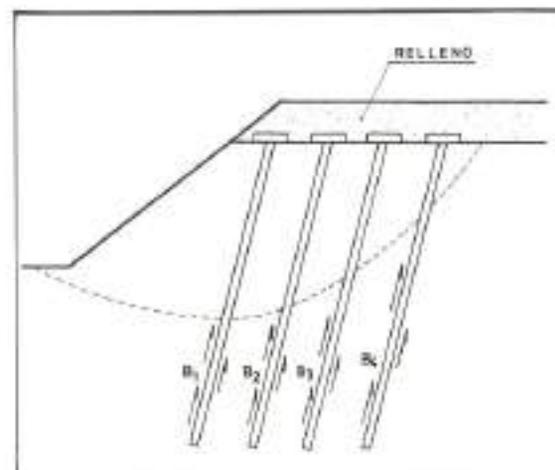


FIGURA 5

se supone que los pilotes son cortos y no llegan por tanto a ningún estrato firme.

En este caso a los pilotes se les suele disponer unos "sombreados" de tal forma que la totalidad del peso de relleno vaya al pilote directamente por su cabeza. Por otra parte el rozamiento negativo también contribuye a la estabilidad del talud tal como se ha indicado en los casos anteriores.

Hay que indicar para estos casos, en que el pilote toma cargas a través del fuste por medio de la adherencia con el terreno, que la hincia de los pilotes reduce localmente el esfuerzo cortante de la arcilla alrededor de los mismos en un 20% a un 30%. Este fenómeno puede reducirse con pilotes ejecutados "in situ".

Si se utilizan pilotes hincados el orden de hincia es importante, debiendo en general comenzar por los más próximos al talud y avanzando hacia atrás, con el fin de reducir el desplazamiento del suelo hacia el talud. Además los pilotes que son hincados en primer lugar actúan como refuerzo del suelo y reducen su desplazamiento lateral.

2.2. INTERACCION QUE PRODUCE FLEXIONES Y ESFUERZOS CORTANTES EN LOS PILOTES.

Como hemos dicho anteriormente los pilotes ofrecen resistencia a que el terreno fluya a través de ellos. Esto se traduce en unas fuerzas que los pilotes, movilizandolos su resistencia lateral, ejercen sobre el talud aumentando su estabilidad (fig. 6).

Estas fuerzas dependen fundamentalmente de los siguientes parámetros:

Parámetros resistentes del terreno C y Ø.

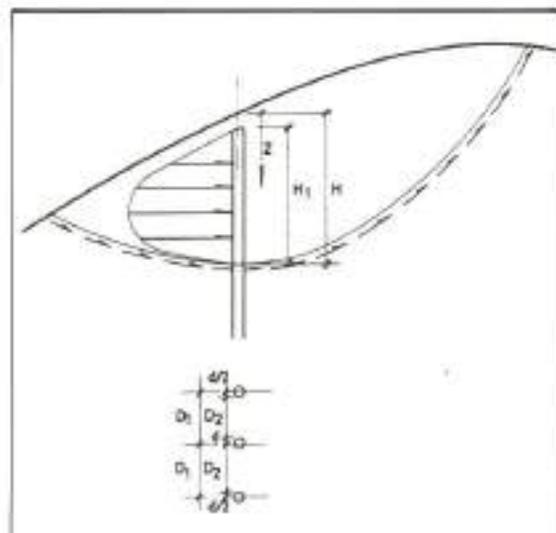


FIGURA 6

Relación D2/D1, siendo D2 el hueco entre pilotes y D1 la distancia entre centros (fig. 6). Cuando la relación D2/D1 disminuye la fuerza del terreno aumenta.

Existen diversas fórmulas para el caso de una fila de pilotes entre las que hemos elegido las dos que siguen:

2.2.1. Fórmula de Tomo Ito para evaluar las fuerzas laterales producidas por el talud en una fila de pilotes. (Soils and Foundations Vol. 21, Nº 1, Mar. 1981).

Suponiendo que alrededor de los pilotes se forma una zona plástica llega a la siguiente ecuación que da la presión en cada cota del pilote, teniendo como origen de profundidades la superficie del suelo:

$$\begin{aligned}
 p(z) = & \epsilon D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{N\phi^{1/2} \tan \phi + N\phi - 1} \left[\frac{1}{N\phi \tan \phi} \left\{ \exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} N\phi \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) - 2 N\phi^{1/2} \tan \phi - 1 \right\} \right. \\
 & \left. + \frac{2 \tan \phi + 2 N\phi^{1/2} + N\phi^{-1/2}}{N\phi^{1/2} \tan \phi + N\phi - 1} \right] - \epsilon \\
 & \left[D_1 \frac{2 \tan \phi + 2 N\phi^{1/2} + N\phi^{-1/2}}{N\phi^{1/2} \tan \phi + N\phi - 1} - 2 D_2 N\phi^{-1/2} \right] + \frac{\tau z}{N\phi} \\
 & \left[D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{N\phi^{1/2} \tan \phi + N\phi - 1} \exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} N\phi \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) - D_2 \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

Donde $N\phi = \tan^2 \left(\pi/4 + \phi/2 \right)$, y el peso específico del suelo.

En caso de suelo sin cohesión la fórmula se obtiene directamente de la anterior sin más que hacer C = 0.

Para suelos cohesivos puros (Ø = 0) la presión se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 P(z) = & C \left[D_1 \left(3 \log \frac{D_1}{D_2} + \frac{D_1 - D_2}{D_2} \tan \frac{\pi}{8} - \right. \right. \\
 & \left. \left. - 2 (D_1 - D_2) \right] + \tau z (D_1 - D_2)
 \end{aligned}$$

2.2.2. Fórmula de Broms para evaluar las fuerzas laterales producidas en una fila de pilotes. (Soils and Foundations Vol. 23, Sept. 1983).

Broms supone que la presión sobre los pilotes puede obtenerse aplicando las fórmulas correspondientes a la carga de hundimiento de una cimentación superficial.

Para un suelo coherente puro (Ø = 0) el esquema es el de la fig. 7.

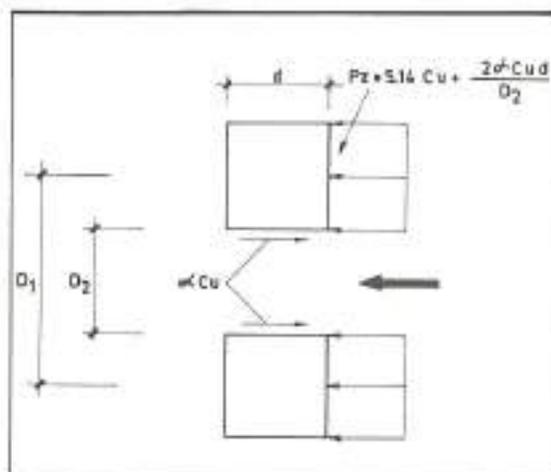


FIGURA 7

La adherencia suelo-pilote vale αCu donde α varía entre 0,5 y 1,0. Para arcilla floja $\alpha = 0,8 - 1,0$. Para arcilla dura $\alpha = 0,4 - 0,5$. Cu es la cohesión del suelo sin drenaje.

Aplicando la fórmula de la carga de hundimiento tenemos que la presión $P(Z)$ vale:

$$P(Z) = C N_c + q N_q \quad q = \frac{2\alpha C u d}{D_2}$$

Para $\phi = 0$

$$P(Z) = 5,14 C u + \frac{2\alpha C u d}{D_2}$$

Por tanto la fuerza por unidad de longitud de pilote valdrá

$$P_u = \left(5,14 C u + \frac{2\alpha C u d}{D_2} \right) d + 2\alpha C u d = C u d$$

$$\left(5,14 + \frac{2\alpha d}{D_2} + 2\alpha \right) = C u \left(5,14 + \frac{2\alpha D_1}{D_2} \right)$$

Haciendo el mismo análisis para un suelo sin cohesión y con ángulo de rozamiento tenemos el esquema que se representa en la fig. 8.

La presión que el suelo ejerce sobre el pilote se puede calcular por la fórmula:

$$P(Z) = P_h N_q$$

Donde N_q es función del ángulo de rozamiento interno del suelo.

P_h depende de la fricción suelo-pilote que es función de la presión normal efectiva sobre la cara de los pilotes en la zona de terreno confinada entre ellos. Esta presión normal se estima que vale $K_p P_h$ siendo K_p el coeficiente de empuje pasivo (fig. 8).

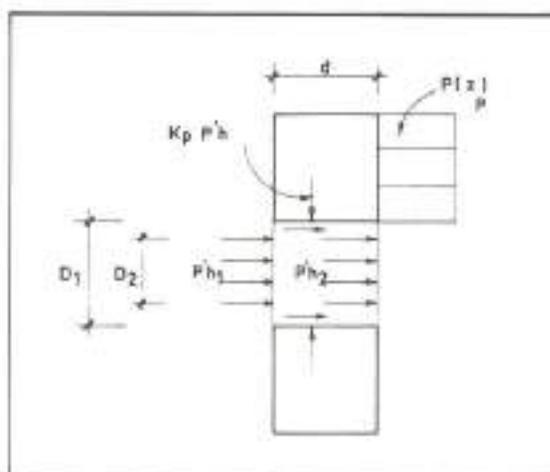


FIGURA 8

Si aislamos una rebanada de terreno dentro de la zona confinada tenemos (fig. 9).

$$d P_h D_2 = 2 K_p P_h \text{ tang } \phi_a dx$$

$$\frac{d P_h}{P_h} = \frac{2 K_p \text{ tang } \phi_a}{D_2} dx$$

$$\ln \frac{P_h}{K} = \left(\frac{2 K_p \times \text{tang } \phi_a}{D_2} \right) x$$

$$P_h = K \exp \left(\frac{2 K_p \times \text{tang } \phi_a}{D_2} x \right)$$

Para $X=0$; $P_h = P_{h1}$ por tanto $K = P_{h1}$

Para $X=d$; $P_{h2} = P_{h1} \exp \left(\frac{2d K_p \text{ tang } \phi_a}{D_2} \right)$

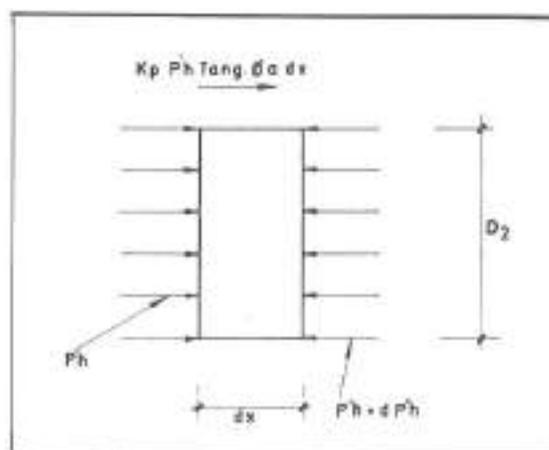


FIGURA 9

P_{hl} se calcula mediante la expresión:

$$P_{hl} = K_0 \gamma h$$

Siendo K_0 el coeficiente de empuje al reposo, γ el peso específico del suelo, h es la profundidad bajo la superficie del suelo y $\tan \varnothing_a$ el coeficiente de rozamiento suelo-pilote. Para pilotes de hormigón $\varnothing_a \approx \varnothing'$ y para pilotes de acero $\varnothing_a 20 - 25^\circ$.

Por tanto la fuerza total por unidad de longitud de pilote a la profundidad h vale:

$$P_v = 2K_p \tan \varnothing_a P_{hl} \int_0^d \exp\left(\frac{2 \times K_p \tan \varnothing_a}{D_2}\right) dx + dN_q P_{hl} \exp\left(\frac{2dK_p \tan \varnothing_a}{D_2}\right)$$

Según indica Broms los desplazamientos para que se movilice la resistencia lateral de los pilotes son mucho mayores que los requeridos para que se movilicen los esfuerzos por rozamiento negativo y no es posible en general utilizar simultáneamente el rozamiento negativo y la resistencia lateral de los pilotes.

3. ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD.

Determinadas las fuerzas que actúan sobre los pilotes pasivos, el cálculo del coeficiente de seguridad frente al deslizamiento del talud puede hacerse por cualquiera de los métodos habituales.

Así tenemos que si hemos definido el coeficiente de seguridad al deslizamiento sin pilotes por la relación:

$$F = \frac{M_r}{M_m}$$

Cuando tengamos en cuenta los pilotes el coeficiente de seguridad será:

$$F + \Delta F = \frac{M_r + TR \cos \beta - m}{M_m} \geq 1,20$$

Donde:

M_r es el momento resistente al deslizamiento del suelo.

M_m es el momento deslizante

T es el esfuerzo cortante en el pilote en su punto de intersección con la superficie de deslizamiento.

m es el momento flector en el pilote en el mismo punto que T .

R es el radio del círculo

Con los pilotes estabilizadores debemos alcanzar un coeficiente de seguridad mínimo frente al deslizamiento de 1,20 (Tomo ITO, Cartier G. Delmas) aunque otros autores proponen

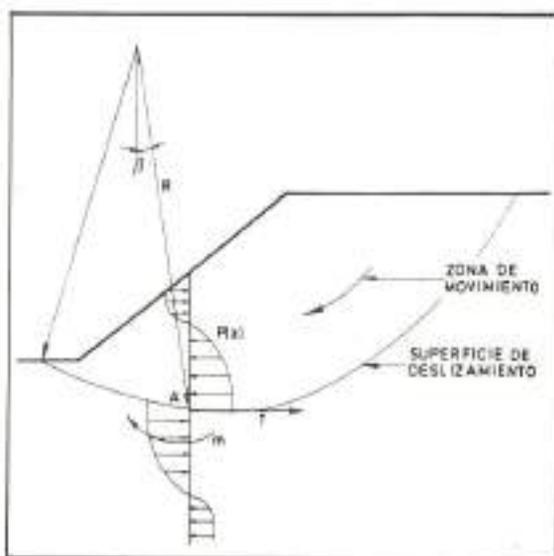


FIGURA 10

valores menores, como por ejemplo Sonner que propone para F un valor de 1,05.

4. ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DE LOS PILOTES.

Mediante las fórmulas dadas en el punto 2, podemos calcular las fuerzas que actúan en el pilote por encima de la superficie de deslizamiento. La zona de pilote que queda por debajo de dicha superficie podemos considerarla como una viga elástica con lo que podemos determinar los momentos flectores y esfuerzos cortantes máximos que aparecen en el mismo.

En una serie de estudios hechos por Tomo Ito (Soil and Foundations Vol 21, Nº 1, Marzo 1981), se ha visto que el fallo del pilote se produce siempre por plastificaciones producidas por flexión, quedando los esfuerzos cortantes muy por debajo del cortante que es capaz de resistir el pilote. Una salvedad la constituye el caso de pilotes estabilizadores cosiendo una fisura entre rocas, ya que dada la gran rigidez de la roca el pilote trabajará en este caso a corte puro y su fallo, en caso de producirse, será por este motivo. Ito define el coeficiente de seguridad frente a la rotura del pilote por la siguiente relación:

$$(F_s)_{\text{pilote}} = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{max}} \geq 1$$

Donde

σ_{adm} es la tensión admisible del material que constituye el pilote.

σ_{max} es la tensión máxima que aparece en el pilote en cálculo a flexión.

La tensión máxima debe obtenerse en la hipótesis de la fuerza máxima que el talud puede ejercer sobre el pilote (se moviliza la totalidad del esfuerzo lateral) y en este supuesto se dará como bueno el resultado si el coeficiente de seguridad es igual o superior a la unidad.

Itto ha resuelto, en el supuesto de que las cargas producidas por el talud sobre los pilotes son las correspondientes a su fórmula, la distribución de esfuerzos cortantes y momentos flectores sobre un pilote para diferentes condiciones de sustentación de la cabeza del mismo tales como: Cabeza libre (rotación y desplazamiento); Cabeza empotrada con deslizadera (desplazamiento sin rotación), cabeza articulada (rotación sin desplazamiento) y cabeza empotrada (no hay rotación ni desplazamiento). Las soluciones son válidas cuando la parte del pilote que queda por debajo de la superficie de deslizamiento puede considerarse como semi-infinita. Los resultados figuran en la referencia indicada anteriormente.

5. CONCLUSIONES

Los pilotes pasivos usados para estabilizar taludes están sometidos a solicitaciones complejas que inducen en los mismos esfuerzos axiales, cortantes y de flexión. No es fácil saber de una forma exacta cómo va a trabajar un pilote metido en un talud, sin embargo, dependiendo de su situación en el mismo y de su inclinación, predominarán las soli-

citaciones por esfuerzos axiales o bien por cortantes y flexiones.

En los apartados anteriores hemos expuesto las fórmulas de diversos autores para calcular los esfuerzos máximos sobre los pilotes según trabajen a flexión o a esfuerzo axial. Sin embargo, dado lo complejo del problema, a la hora de evaluar su efecto estabilizador no parece prudente contabilizar ambas formas de trabajo simultáneamente y los pilotes deben disponerse en el talud para que trabajen fundamentalmente de una u otra forma. En general los movimientos requeridos en el talud para movilizar la resistencia lateral de los pilotes deben ser mucho mayores que los que movilizan su resistencia por fuste, si los pilotes están dispuestos de forma adecuada.

Los esfuerzos que el talud induce en los pilotes dependen fundamentalmente de las características del terreno y de la separación entre pilotes.

A parte de comprobar las condiciones de estabilidad del talud con la incorporación de los pilotes también hay que comprobar que cada pilote puede resistir los esfuerzos máximos a que puede estar sometido.

La resistencia lateral se ha resuelto para una fila de pilotes. Para más filas, en el estado actual de la cuestión (ITO, Soils and Foundations Vol. 22, Nº 1, Mar. 1982) se pueden extrapolar los resultados obtenidos para una sola fila siempre que éstas estén lo suficientemente alejadas unas de otras.

AGUA

VIVA

El agua padece múltiples agresiones contaminantes
en su recorrido natural.

Es imprescindible que llegue al usuario con
el tratamiento adecuado.

CADAGUA está presente allí donde se exige la mejor agua.



Depuradora de Butarque - Madrid



cadagua, s.a. Damos vida.

Conducimos
el agua...



...NATURALMENTE.

El agua es un bien de la naturaleza imprescindible y limitado.

La demanda creciente de agua trae consigo que cada vez haya de ser buscada y llevada más lejos, a través de conducciones que han de resistir presiones elevadas y no alterar las propiedades originales de tan preciado líquido.

FIBROTUBO ofrece tuberías resistentes, duraderas, fabricadas para que el agua llegue siempre... naturalmente.

25
FIBROTUBO
AÑOS

FIBROTUBO

FIBROTUBO - FIBROLIT, S.A. c/ Hortaleza, 2 - 4º 28004 Madrid