



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstrucion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile  
Chile

PEÑA FRITZ, A.; MÁRQUEZ, M.; LLORENS, M.

Análisis de la influencia de los efectos parásitos para estribos pilotados de puentes en suelos blandos

Revista de la Construcción, vol. 12, núm. 1, abril, 2013, pp. 4-16

Pontificia Universidad Católica de Chile

Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127628890002>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*Analysis of the Influence of  
parasitic effects on piles in  
soft soils*

# Análisis de la influencia de los efectos parásitos para estribos pilotados de puentes en suelos blandos



## Autores

**PEÑA FRITZ, A.** Pontificia Universidad Católica de Valparaíso,  
alvaro.pena@ucv.cl  
Valparaíso, Chile

**MÁRQUEZ, M.** Dirección de Vialidad, MOP, Gobierno de Chile  
marcelo.marquez@mop.gov.cl  
Santiago, Chile

**LLORENS, M.** Dirección Depto Estructuras de Edificación, Acciona Infraestructuras  
mllorens@accionae.es  
España

**Fecha de recepción** 22/10/2012

**Fecha de aceptación** 10/12/2012

## Resumen

La estimación de los efectos parásitos que pueden generarse sobre los pilotes en suelos blandos (ya sea rozamiento negativo y/o empujes horizontales), puede abordarse con distintas recomendaciones incluidas en la literatura técnica y en las normativas de algunos países, pero no suele encontrarse ningún análisis específico aplicable a estribos pilotados. Sin embargo, la experiencia demuestra que si no se tienen en cuenta estos efectos en el cálculo, pueden producirse importantes daños en los pilotes y en las estructuras que soportan, existiendo numerosos ejemplos al respecto, especialmente cuando el suelo presenta estratos de suelos blandos de grandes espesores. No obstante lo anterior, una estructura pilotada puede diseñarse para resistir los efectos parásitos, teniendo en cuenta además la consideración de otros aspectos importantes,

como por ejemplo el coste de la obra, plazos de ejecución, comportamiento a largo plazo, etc, para tratar de optimizar su repercusión económica. De esta forma en muchas ocasiones la forma más eficaz de resolver el problema es la de realizar trabajos complementarios que mejoren las características del terreno para minimizar los efectos parásitos, como por ejemplo, aplicación de precargas al terreno para consolidarlo antes de ejecutar los pilotes. De acuerdo a lo anterior, este trabajo pretende analizar las principales recomendaciones y normativas existentes en Chile y España, así como otras publicaciones nacionales e internacionales, que tratan el tema de los efectos parásitos en cimentaciones profundas, con el objeto de contrastar los distintos parámetros que resultan más sensibles.

**Palabras clave:** Estribos pilotados en suelos blandos, rozamiento negativo, efectos parásitos en pilotes.

## Abstract

*The estimation of parasitic effects that can be generated on the piles in soft soils, (being negative friction and / or horizontal thrust) can be addressed with several recommendations contained in the technical literature and in the regulations of some countries, but it is usually not found any specific analysis applicable to piloted abutments. However, experience shows that without taking these effects into account in the calculation, there may be significant damage to piles and structures that support, existing many examples in this regards, especially when the soil has layers of large thickness of soft soils. Nevertheless, a pilot structure can be designed to resist the parasitic effects, taking into*

*account also the consideration of other important issues, such as the cost of the construction, construction deadlines, long-term behaviour, etc, to try to optimize their economic impact. Thus, often the most effective way to solve the problem is doing additional work to improve the characteristics of the ground to minimize parasitic effects, such as application of preloads to the field to consolidate before building the piles. According to the above, this work analyses the main recommendations and regulations existing in Chile and Spain as well as other national and international publications, dealing with the issue of parasitic effects in deep foundations, in order to contrast the different parameters.*

**Keywords:** Bridge abutments, thrusts on piles, soft soils, negative friction, parasitic effects in piles.

## 1. Introducción

Las cimentaciones profundas en base a pilotes han de soportar las cargas que la estructura transmite al terreno, no obstante lo cual, también pueden estar solicitados por pesos o empujes del terreno y/o del agua, así como por acciones derivadas del movimiento del propio terreno de cimentación.

A los efectos que produce el movimiento del terreno sobre los pilotes se les denomina efectos parásitos.

Si el movimiento de tierras es paralelo al eje del pilote se induce una fricción sobre él, que tiende a cargarlo, con independencia de las acciones que transmite la estructura en esa cimentación. Esta fricción se denomina rozamiento negativo que pasa así a inducir una nueva acción sobre el pilote, al mismo tiempo que elimina la posibilidad de contar con la resistencia de fuste en la zona en que se genera.

Si hay una componente del movimiento del terreno perpendicular al pilote, las acciones internas que se inducen resultan ser equivalentes a unos empujes horizontales o laterales, originándose así, unos esfuerzos de flexión en los pilotes, con los correspondientes giros y traslaciones.

En ambos casos, que pueden producirse simultáneamente, el pilote experimentará movimientos que pueden ser incompatibles por la función de la estructura cimentada. Pero, aún en caso contrario, el pilote quedará sometido a unas tensiones parásitas que habrá que tener en cuenta, a efecto de que no agoten la capacidad mecánica del propio pilote o de que no reduzca excesivamente la capacidad de carga de la cimentación.

## 2. Rozamiento negativo

Considerando el criterio que establece la Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras de España Ref. [2] el procedimiento de cálculo del rozamiento negativo, se resume en los siguientes pasos (ver Fig. 1):

- **Dibujo del perfil de asientos del terreno sin pilotes**

El asiento del terreno debe calcularse primero, en la hipótesis de que no existen los pilotes. Esta estimación de asientos del terreno debe realizarse para puntos situados a diferentes profundidades, dentro de una misma vertical, para conocer la ley de variación de asientos dentro del terreno, con la profundidad.

De esta forma, el asiento de un punto del interior del terreno situado a una profundidad "z", será la suma de los acortamientos de todos los estratos que queden por debajo de esa profundidad.

- **Cálculo del asiento del pilote**

Se debe estimar el asiento del pilote suponiendo el terreno inmóvil, y variando las condiciones de sustentación. Será necesario emplear como datos de cálculo, al menos la carga vertical que actúa sobre pilote y la longitud del pilote dentro del terreno.

Para realizar estos cálculos se supondrá que, desde la superficie hasta una profundidad denominada "x", el terreno no existe y que la carga sobre el pilote es igual a la suma de la carga actuante sobre su cabeza más el peso del pilote y más el rozamiento negativo hasta la profundidad "x". Es decir:

$$P_{VIRUAL} = P + W + R^-(x) \quad (1)$$

Donde:

$P_{virtual}$	= Carga vertical de referencia, incluyendo el rozamiento negativo.
$P$	= Carga vertical que actúa sobre el pilote.
$W$	= Peso propio del pilote.
$R^-(x)$	= Rozamiento negativo hasta la profundidad "x".

El asiento se calcula para diferentes valores de "x". Con los resultados, se podrá dibujar la relación que existe entre el asiento (en cabeza) del pilote y la profundidad de cambio de signo del rozamiento, denominada "x".

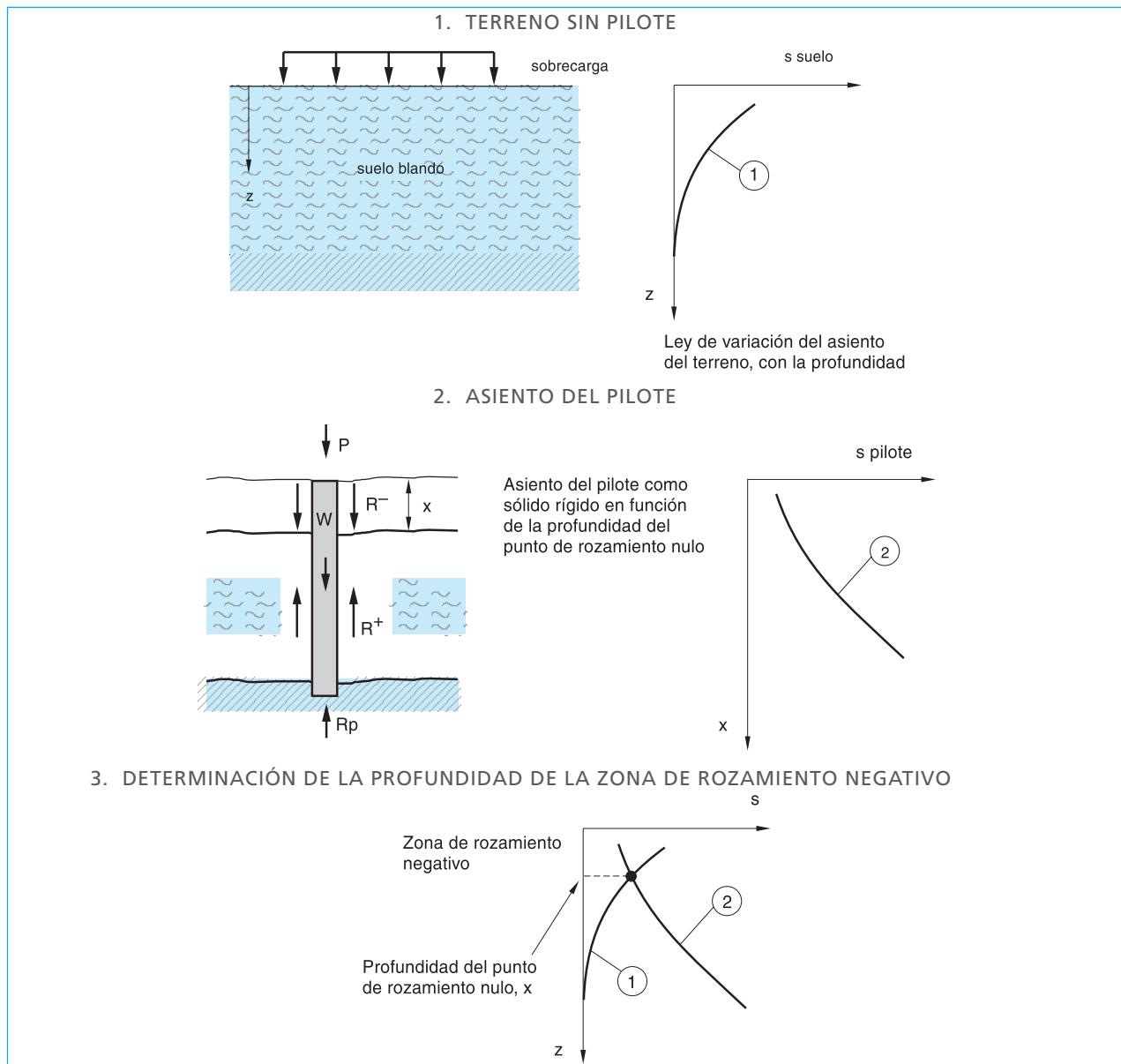
- **Comparación de asientos**

Al comprar ambas curvas de asiento, se obtendrá una profundidad donde el asiento del terreno coincide con el asiento del pilote sometido al rozamiento negativo hasta esa misma profundidad "x". Este punto definirá la profundidad para la carga de servicio considerada.

Por otro lado, las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias ROM 0.5-05 Ref. [13] establecen que el rozamiento negativo unitario (fuerza por unidad de superficie) se debe suponer igual a la resistencia por fuste.

Existen soluciones técnicas (tratamiento con betunes del fuste de pilotes hincados) que reducen notablemente el rozamiento negativo. Si se utiliza alguna de esas técnicas, deberá estimarse el valor del rozamiento negativo unitario correspondiente.

**Figura 1.** Esquema de cálculo simplificado del rozamiento negativo (Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras, 2003 Ref. [2])



Para pilotes flotantes que puedan sufrir asientos de cierta importancia y que solo en contadas ocasiones se utilizan en terrenos que puedan sufrir rozamiento negativo, se puede estimar un valor de "x" menor que la longitud de pilote mediante el procedimiento simplificado que se describe a continuación:

En primer lugar debe realizarse un cálculo de asientos general de la zona, suponiendo que no existen pilotes. Ese cálculo debe incluir no solo la determinación del asiento en la superficie sino también a cualquier profundidad. Es bueno obtener varios puntos de la ley de asientos en profundidad (ver Fig. 2: curva 1).

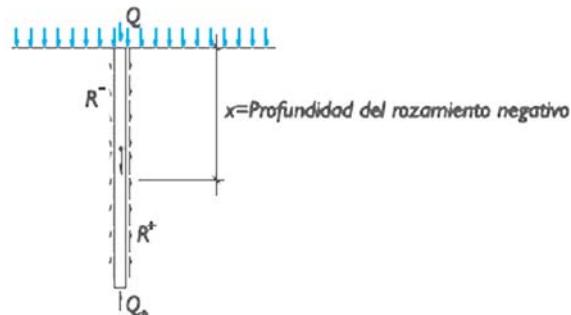
En segundo lugar se examinará el asiento del pilote (o del grupo de pilotes en su caso). Para ello se puede suponer que los pilotes son rígidos y que su asiento viene dado por un valor,  $s_p$ , que depende del valor del rozamiento negativo. Cuanto mayor sea la profundidad hasta la que se suponga que actúa el rozamiento negativo mayor será la carga que se transmite al terreno inferior (Carga + Peso propio +  $R^-$ ) y menor será la amplitud de la zona de sustentación. Como

consecuencia, el asiento del pilote (o del grupo, en su caso) es una función claramente creciente con la profundidad "x" hasta donde se suponga que actúa el rozamiento negativo (ver Fig. 2: curva 2).

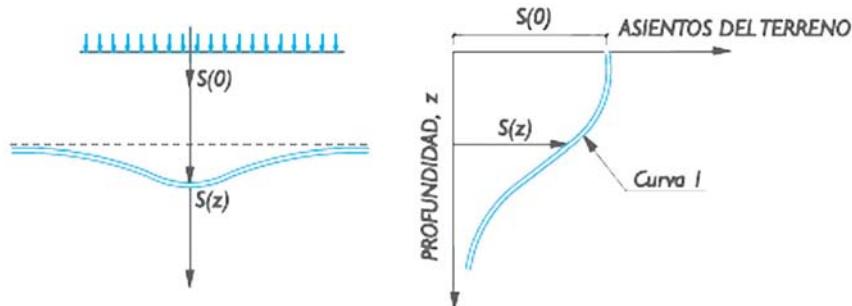
Realizados estos cálculos, se debe tomar como profundidad "x" aquella que conduce a asientos del pilote similares a los que sufriría el terreno a esa misma profundidad cuando no existen pilotes. Es la ordenada de la intersección de las curva 1 y 2 (ver Fig. 2).

**Figura 2.** Esquema de cálculo del rozamiento negativo (ROM 0.5-05 Ref. [13])

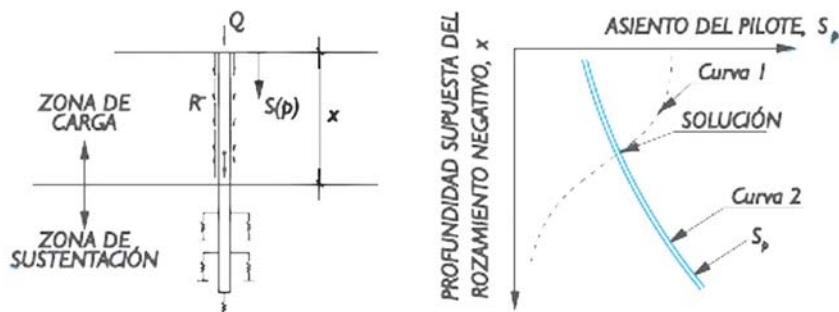
#### A. ESQUEMA DEL EFECTO DEL ROZAMIENTO NEGATIVO



#### B. ASIENTO DEL TERRENO SIN PILOTES



#### C. ASIENTO DEL PILOTE



Por otro lado, de forma simplificada, el rozamiento unitario negativo en el fuste según el Código Técnico de la Edificación de España Ref. [1], se calcula con la expresión:

$$F_{s,neg} = \sum_{i=1}^n \beta_i * \sigma'_{vi} \quad (3)$$

Siendo:

- $\beta_i$  = Cada una de las unidades geotécnicas consideradas a lo largo del pilote.
- $\beta$  = 0,25 en arcillas y limos blandos; 0,1 en arenas flojas y 0,8 en arenas densas.
- $\sigma'_{vi}$  = La tensión efectiva en el punto del fuste considerado.

Cuando el rozamiento negativo no se desarrolle en su totalidad a lo largo del fuste, podrán emplearse métodos de cálculo que consideren deformaciones relativas entre el suelo y el pilote para cuantificar la profundidad hasta la que se produce.

Los pilotes exteriores de los grupos de pilotes deben considerarse sometidos al mismo rozamiento negativo que si estuviesen aislados, especialmente los situados en las esquinas.

### 3. Empujes laterales

Si el pilotaje atraviesa un estrato arcilloso blando puede verse sometido a presiones laterales ocasionadas por movimientos horizontales que experimente el estrato blando, al comprimirse verticalmente, no uniformemente. Como el pilote, en general, tiene menor deformabilidad que el terreno, no puede seguir a este en sus movimientos, por lo que aparecen unas presiones horizontales sobre el fuste del pilote.

Cuando este aspecto no resulte crítico, se recomienda utilizar un procedimiento simplificado que conduzca a resultados del lado de la seguridad. Este procedimiento es conocido con el nombre de la "carga simétrica".

En un problema plano (bidimensional), una barrera de pilotes, de eje vertical, no se mueve horizontalmente por efecto de una sobrecarga cuando la sobrecarga es simétrica respecto a dicho eje.

Con las dos sobrecargas (real y virtual) se calculará la presión horizontal generada  $\sigma_H(z)$ , a cierta profundidad "z", en la vertical del plano de simetría.

El empuje horizontal que habría de soportarse, en el eje de la barrera vertical sería:

$$E = \int_{z_1}^{z_2} B \sigma_H(z) dz \quad (4)$$

Donde:

- E = Empuje horizontal que habría de soportarse en el eje de la barrera (plano de simetría).
- z = Profundidad de cálculo medida desde la superficie, hacia el interior del terreno.
- $\sigma_H(z)$  = Incremento de presión horizontal generada por la carga real y la virtual (simétrica a la real) a la profundidad "z", en la vertical del plano de simetría definido previamente. En todo caso, el valor de  $\sigma_H(z)$ , se limitará a un máximo igual a dos veces la resistencia al corte sin drenaje del estrato blando ( $\sigma_H(z) \leq 2 S_u$ ).
- B = Ancho de cálculo. Se tomará el menor de entre los siguientes:
  - El ancho de la zona cargada.
  - El ancho del grupo de pilotes, más tres veces el diámetro del pilote, medidos ambos perpendicularmente a la dirección del empuje.

Para aquellos casos en los que la sobrecarga que genera el problema sea de gran extensión en planta (su dimensión menor sea del orden del doble de la profundidad del terreno firme), se puede utilizar:

$$E = K_o p B H \quad (5)$$

Donde:

- E = Empuje que habría de soportarse en el plano de simetría.
- p = Valor de la sobrecarga que crea el empuje horizontal.
- $K_o$  = Coeficiente de empuje al reposo.
- B = Ancho de cálculo, definido en el párrafo precedente.
- H = Espesor del estrato blando.

Cuando se trate de un grupo de pilotes con más de una fila, el cálculo ha de realizarse suponiendo que la barrera vertical del cálculo está ubicada en la primera fila de pilotes, que será la más próxima a la carga, suponiendo que los demás no existen.

El empuje que se determine será el que corresponda a todo el grupo de pilotes. Esto implica el empuje a cada pilote según el criterio que se desarrolla en este trabajo.

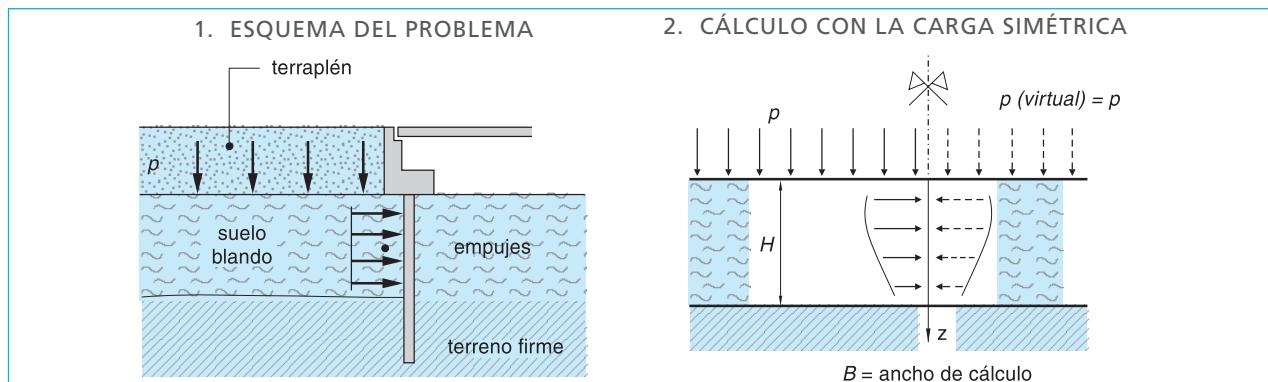
Cuando existe una sola alineación o fila de pilotes, se considera admisible repartir el empuje total estimado en partes iguales entre cada pilote de la pantalla.

Cuando existen varias alineaciones o filas de pilotes, los pilotes más expuestos a la generación de esfuerzos horizontales parásitos son los que están más próximos a las cargas superficiales que la provocan, o los que están más próximos a la cabeza de los taludes.

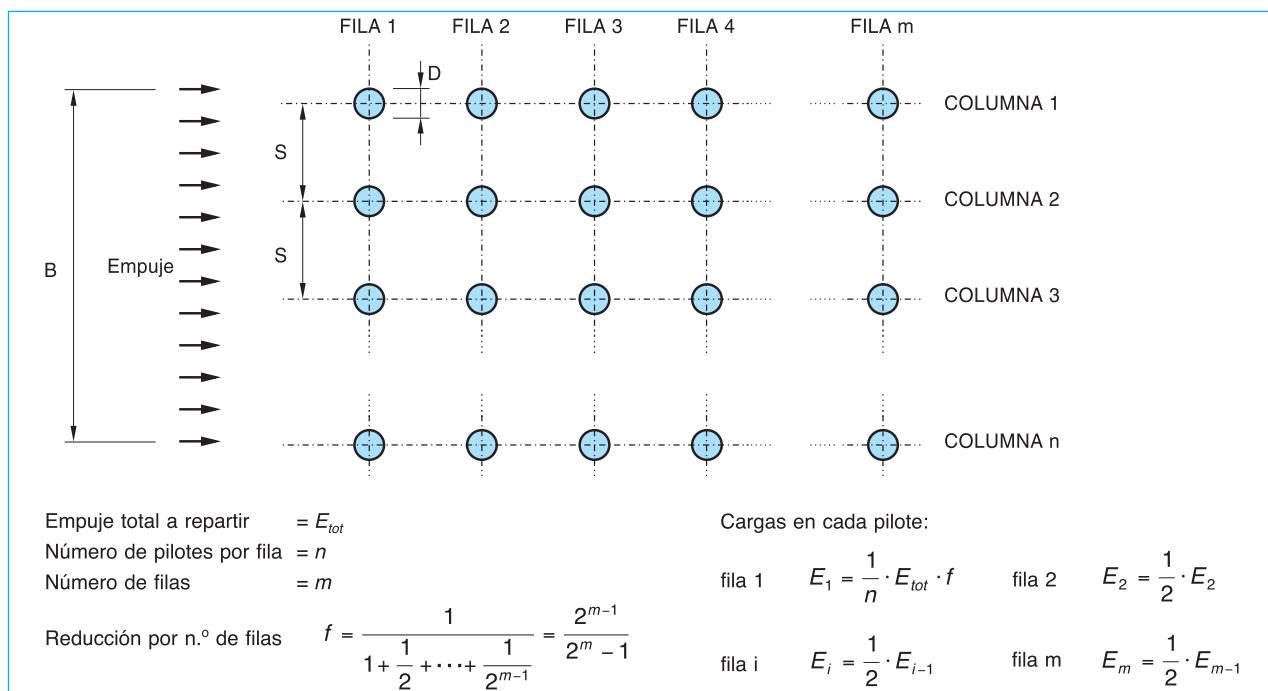
Si el problema de la distribución resulta crítico requiere un análisis de interacción (cálculo con modelos numéricos).

Como norma general simplificada, se puede suponer que los esfuerzos totales se distribuyen entre las sucesivas alineaciones o pantallas, asignando a cada una de ellas un valor mitad que la anterior (ver Fig. 4).

**Figura 3.** Esfuerzos horizontales causados por sobrecargas (Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras, 2003 Ref. [2])



**Figura 4.** Efecto grupo en los esfuerzos parásitos horizontales (Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras, 2003 Ref. [2])



Como método simplificado para la consideración del empuje horizontal en pilotes, de acuerdo al Código Técnico de la Edificación de España Ref. [1], el empuje horizontal se estimará de acuerdo con la siguiente expresión:

$$p_h = p_v - 2C_u \quad (6)$$

Siendo:

- $p_v$  = La presión vertical en la parte superior del estrato blando, considerando un reparto a  $30^\circ$  de las presiones en superficie.
- $C_u$  = La resistencia al corte sin drenaje. Se supondrá que cada pilote soporta una carga por unidad de longitud igual al valor menor de los siguientes:
- $P_p$  =  $p_h * S$ , siendo  $S$  la separación entre ejes de pilotes.
- $P_p$  =  $p_h * 3D$ , siendo  $D$  el diámetro del pilote.
- $P_p$  =  $p_h * H$ , siendo  $H$  el espesor del estrato blando.

Cuando existan varias filas de pilotes se podrá suponer que los esfuerzos se distribuyen entre las sucesivas filas de acuerdo con la siguiente expresión:

$$p'_h = p_h - \frac{P_p}{S} \quad (7)$$

que se aplicará de forma sucesiva

$$p''_h = p'_h - \frac{P_p}{S}; \dots; p^n_h = p^{n-1}_h - \frac{P_p}{S}$$

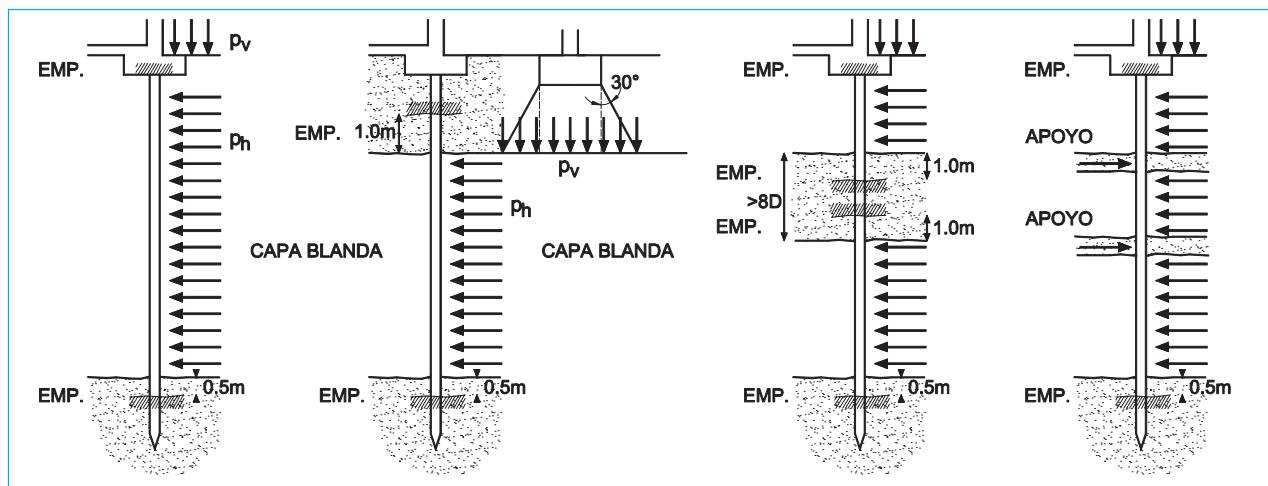
Una vez calculado el valor de  $P_p$  se obtendrán los valores de los momentos flectores en los pilotes como una viga, suponiendo, según los casos, las condiciones en los apoyos que se concretan en:

empotramiento en cabeza.  
empotramiento a 0,5 m en la capa resistente inferior.  
empotramiento a 1 m en capas resistentes situadas por encima de la capa blanda si su espesor es superior a 8 diámetros, en caso contrario se considerará como una articulación (apoyo).

Con relación al Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile Ref. [3], el diseño y análisis estructural de los puentes de carretera y estructuras afines, se realiza ciñéndose a las disposiciones establecidas en los siguientes documentos:

- "Standard Specifications for Highway Bridges, Seventeenth Edition, 2002" de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Ref. [14] y sus posteriores modificaciones.
- Capítulo 3.1000 del Volumen N° 3, Instrucciones y Criterios de Diseño, del Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad Ref. [3].

**Figura 5.** Condiciones de apoyo para el cálculo de esfuerzos horizontales en los pilotes (Código Técnico de la Edificación, 2006 Ref. [1])



En la sección 4 de la Norma AASHTO Ref. [14] se entregan las disposiciones y criterios de diseño para las fundaciones de puentes y obras afines. Estas disposiciones deben ser respetadas en su totalidad en los diseños desarrollados en Chile.

En el tópico 3.1002.4 del Manual de Carreteras Ref. [3] se entregan los requisitos generales del Reconocimiento Geotécnico para desarrollar los estudios de las fundaciones de los puentes y obras anexas. En todo lo que no se contradiga con esas disposiciones, regirá lo establecido en el Artículo 4.3 de la Norma AASHTO Ref. [14].

Los modelos de análisis planteados en el tópico de fundaciones del Manual de Carreteras Ref. [3], pueden ser reemplazados por otros publicados en la literatura técnica, siempre y cuando tengan un respaldo teórico válido y cuenten con la aprobación de la Dirección de Vialidad.

Los pilotes sometidos a solicitudes horizontales y de momento aplicadas en sus cabezas se tratan como vigas en medio elástico, en las que la colaboración lateral del suelo se inicia a partir de la mayor profundidad entre el inicio del suelo competente y la profundidad de socavación total. Si las solicitudes corresponden a cargas sísmicas, se considerará una profundidad de socavación igual al porcentaje de la socavación máxima que corresponde al peligro de socavación sísmica (PSS). El inicio del suelo competente podrá ser la superficie del terreno, salvo que los horizontes superficiales correspondan a suelos blandos con baja restricción lateral, o bien suelos susceptibles de licuarse durante un evento sísmico.

La interacción horizontal a través del suelo entre los pilotes de un grupo se cuantifica multiplicando por un factor de corrección,  $C_r$ , el coeficiente de incremento lineal del módulo de deformación del suelo,  $f_{eq}$ , o el módulo de deformación del suelo,  $E_0$ , para suelos con módulo de deformación constante con la profundidad.

Los valores de  $C_r$  es función de la distancia normalizada entre ejes de pilotes adyacentes.

Respecto a las solicitudes sísmicas, para el caso de solicitudes sísmicas (cíclicas) se utilizarán los valores de  $f_{eq}$  y  $E_0$  definidos para solicitudes estáticas, multiplicándolos por los factores de rigidez sísmica,  $F_r$ . Estos factores incorporan las deformaciones elásticas a las que se adicionan las deformaciones no recuperables generadas en el suelo por la solicitud cíclica del sismo.

Las solicitudes horizontales estáticas sobre el pilote se determinan imponiendo en la base de los resortes o muelles de interacción los desplazamientos horizontales del suelo blando y del terraplén, desplazamientos que se determinan ignorando la restricción lateral suministrada por los pilotes. En lugar de imponer desplazamientos en la base de los resortes o muelles se podrá imponer fuerzas.

#### 4. Análisis de los efectos parásitos para un estribo pilotado real

En este apartado se presenta la comparación de los métodos analíticos con los métodos numéricos para analizar la influencia de los efectos parásitos en el caso de un estribo pilotado para un viaducto en el sur de España. Para el caso del método analítico se empleó el propuesto por la Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras Ref. [2] que a nuestro juicio contempla de forma más rigurosa el análisis y por otro lado un análisis con métodos numéricos empleando el programa computacional PLAXIS 8.2 basado en la teoría de elementos finitos.

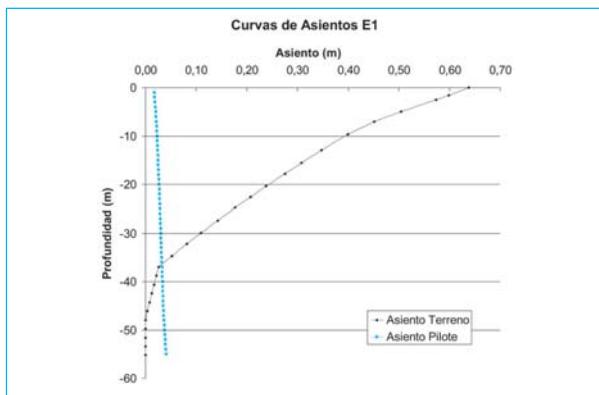
##### 4.1. Rozamiento negativo

Para la determinación del incremento de fuerzas axiles que genera el rozamiento negativo se realiza el dibujo del perfil de asientos del terreno, determinación del asiento del pilote y finalmente la comparación de asientos obteniendo por último la profundidad donde el asiento del pilote sometido a rozamiento negativo coincide con el asiento del terreno. La compresión máxima inducida por el rozamiento negativo será igual a la integración del rozamiento por fuste que corresponda a la zona de pilote ubicada por encima del punto a analizar (ver Fig. 6).

Se observa que las curvas se intersectan a una profundidad estimada de 38 m, punto en el cual el asiento del terreno coincide con el asiento del pilote sometido a rozamiento negativo hasta esa profundidad.

Debido a lo anterior, el incremento de axial debido al rozamiento y al peso propio del pilote que se produce en cada elemento de la fila más próxima a la sobrecarga es 7300 kN y a la profundidad de 38 m, los pilotes estarán solicitados por un axial de 5441 kN.

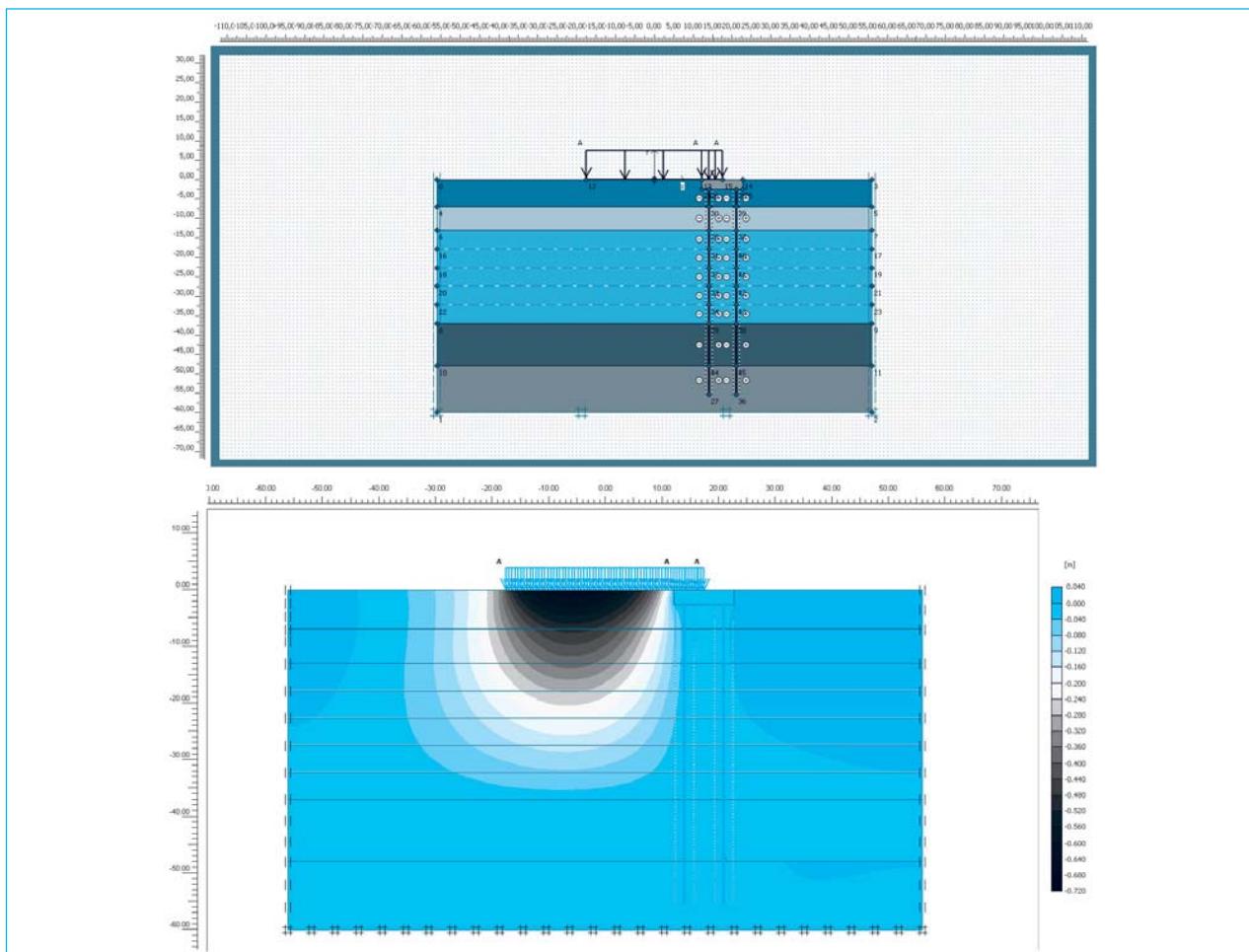
**Figura 6.** Curva asientos del terreno v/s asiento en cabeza de pilote en sector del estribo



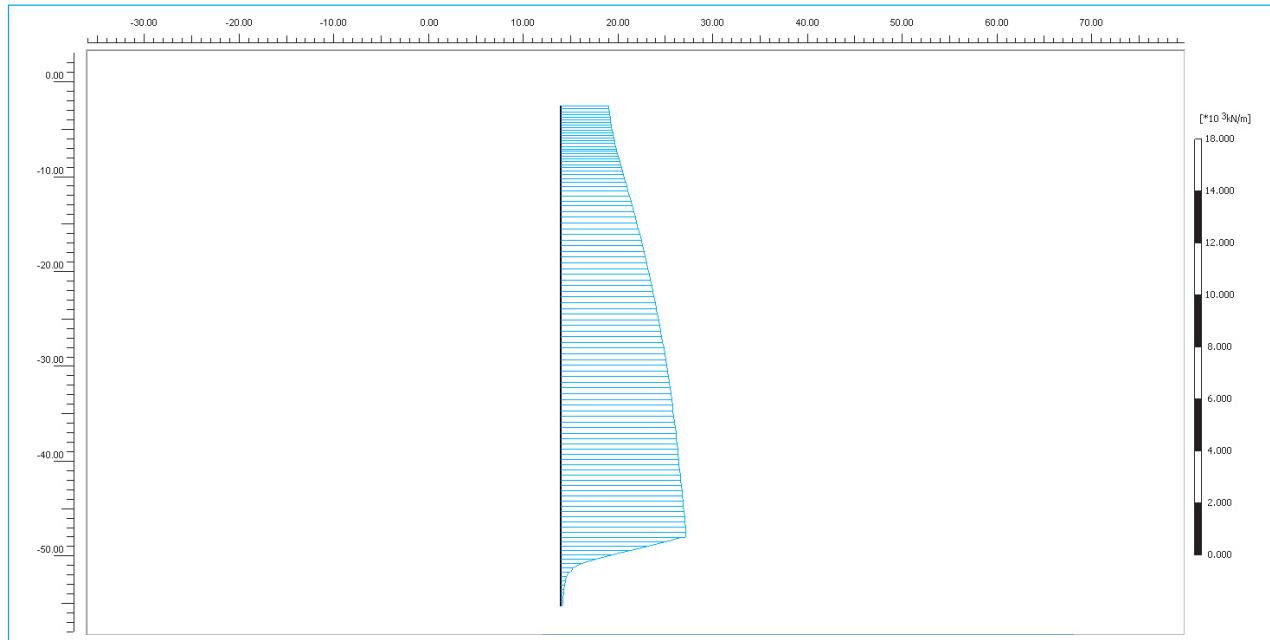
Para el análisis de los efectos parásitos en estribos pilotados se realizó un análisis mediante un modelo numérico bidimensional con el programa PLAXIS en su versión 8.2 basado en la teoría de los elementos finitos.

En dicho análisis se modeló la sobrecarga con sus dimensiones y cargas de acuerdo a cada estribo (considerando las mismas dimensiones y cargas que para el método analítico), además de la estratigrafía y parámetros geotécnicos, con los cuales se obtuvieron los valores de deformación a tiempo infinito.

**Figura 7.** Diagrama de asientos estribo E1



**Figura 8.** Diagrama de esfuerzo axial en pilote del estribo



#### 4.2. Empujes horizontales o laterales

En relación con la consideración del rozamiento negativo en el cálculo de cimentaciones profundas, ninguna de las publicaciones, normas y recomendaciones técnicas estudiadas establece procedimientos para considerar este efecto en estribos pilotados, ya que lo analizan de forma general para todo tipo de estructura pilotada.

La Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras Ref. [2] y el Código Técnico de la Edificación Ref. [1] solo establecen procedimientos generales, y en algunos casos métodos simplificados, de cómo considerar este efecto en el cálculo de pilotes, independientemente de si estos se encuentran ubicados en estribos o pilas.

$$\sigma_z = \frac{p}{2\pi} \left( \operatorname{tg}^{-1} \frac{ab}{zR_3} + \frac{abz}{R_3} \left( \frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} \right) \right)$$

$$\sigma_x = \frac{p}{2\pi} \left( \operatorname{tg}^{-1} \frac{ab}{zR_3} - \frac{abz}{R_1^2 R_3} \right)$$

$$\sigma_y = \frac{p}{2\pi} \left( \operatorname{tg}^{-1} \frac{ab}{zR_3} - \frac{abz}{R_2^2 R_3} \right)$$

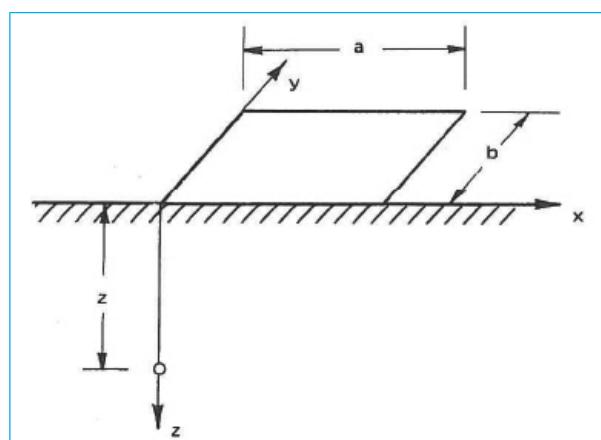
donde:

$$R_1 = (a^2 + z^2)^{1/2}$$

$$R_2 = (b^2 + z^2)^{1/2}$$

$$R_3 = (a^2 + b^2 + z^2)^{1/2}$$

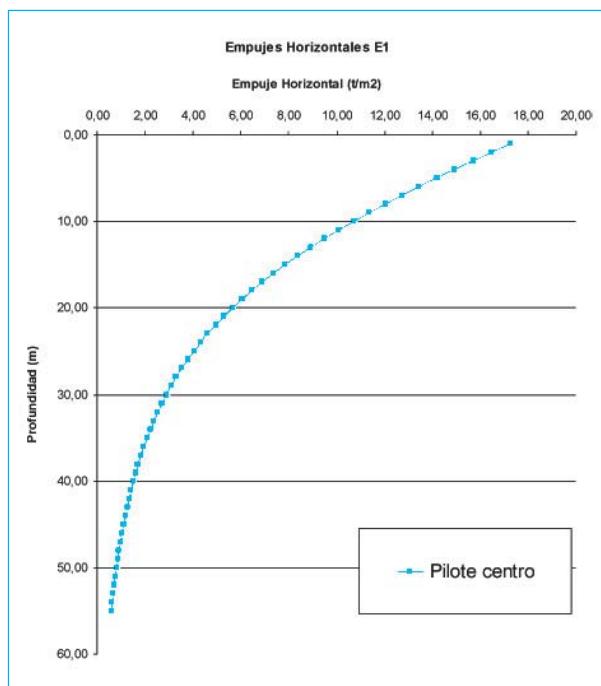
**Figura 9.** Esquema para cálculo de incremento de cargas a una profundidad  $z$



Considerando una sobrecarga simétrica respecto al eje vertical de la línea de pilotes más cercana a la sobre-

carga de 70 m de largo (35 m hacia cada lado de la línea de eje de pilotes), de ancho igual 45 m (ancho de estribo) y de  $181 \text{ kN/m}^2$  para el estribo, se obtiene la presión horizontal  $\sigma_x$  en función de la profundidad, cuyos valores se han graficado de acuerdo a lo observado en la Fig. 8 y en la Fig. 9.

**Figura 10.** Curva de incremento de carga horizontal en estribo E1



#### 4.3. Conclusiones

Comparando los resultados obtenidos utilizando el método analítico y el modelo numérico se observa que el incremento de axil y los empujes laterales, con el método analítico los valores se encuentran por el lado de la seguridad y bastante conservadores, específicamente para el empuje lateral, en vista que se consideran unas hipótesis simplificadas del terreno, no obstante es un buen método para obtener valores que se puedan comparar con los resultados obtenidos con los modelos numéricos y poder así validar estos últimos.

Específicamente de los resultados obtenidos en relación con el incremento del axil en los pilotes, con el método analítico se obtienen valores mayores que con el modelo numérico donde a una profundidad de 38 m, el axil es mayor en un 17,5%.

Cabe mencionar que el método analítico es una buena herramienta para determinar en forma aproximada la profundidad a la cual el pilote se verá afectado por rozamiento negativo.

En relación con el empuje horizontal, se obtienen leyes de empuje diferentes entre ambos métodos. Se estima que esto se debe principalmente a que para el cálculo analítico se suponen hipótesis simplificadas del terreno que lo hacen a su vez obtener resultados más desfavorables, sin embargo con el modelo numérico. En el caso de existir una completa información geotécnica del terreno, se consideran las condiciones y parámetros más reales de este.

## 5. Referencias

Código Técnico de la Edificación (2006). Editado por el Ministerio de la Vivienda de España.

Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras, 2003. Editada por la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento de España.

Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad (2003). Editado por el Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile.

Marche, R. y Lacroix, Y. (1972): "Stabilité des Culées de Ponts Étallies sur des Pieux Traversant une Conche Molle". Canadian Geotechnical Journal, Vol. 9, pp. 1-24.

Marche, R. y Schneeberger, C. E. (1977): "Bending Moments Prediction in Piles subjected to Horizontal Soil Movements". 9th Int. Conf. on Soil. Mech. y F.E., Tokyo. Special Session N° 10, pp. 93-99.

Menard, L. (1962): "Comportement d' une Fondation Profonde Soumise a des Efforts de Reversement". Sols Soils, Vol. 3, N° 4, pp. 9-23.

Oteo, C. (1974): "Discussión on Analysis of Piles in Soil Undergoing Lateral Movement". Journal of the Geotch. Eng. A.S.C.E. Abril, pp. 464-467.

Oteo, C. (1977): "Horizontally Load Piles. Deformation Influence". 9th Int. Conf. on Soil Mech. and F.E., Tokyo. Special Session N° 10, pp. 101-106.

Poulos, H. G. (1985): "Ultimate Lateral Pile Capacity in Two-Layer Soil". Geotechnical Engineering, Vol. 16 (1), pp. 25-37.

Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias R.O.M 0.5-05, Ministerio de Fomento, España.

Standard Specifications for Highway Bridges, Seventeenth Edition, 2002" de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).