

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA CIMENTACIÓN DE ESTRIBOS DE ESTRUCTURAS EN SUELOS BLANDOS

Francisco Rubio García

ICCP. Doctorando de la Universidad de Granada

Isidro Ocete Ruiz

Licenciado Ciencias Geológicas. Jefe Departamento de Suelos de Geotécnica del Sur S.A.

JC Hernández Garvayo

ICCP. Director Técnico de Geotécnica del Sur. S.A.

Ramón García Sánchez

ICCP. Jefe de la Oficina Técnica de Carreteras de la Junta de Andalucía. (Jaén)

Juan Carlos Hernández del Pozo

ICCP. Profesor Titular de Universidad. Prof. Responsable de Geotecnia y Cimientos de la Universidad de Granada

RESUMEN: En el presente documento se presenta un análisis comparativo, desde el punto de vista geotécnico, de cada una de las posibles soluciones que debe plantearse el proyectista a la hora de optimizar los recursos. Concretamente, se estudia el caso para suelos tipo limo o arcilla de baja compacidad, típicos de depósitos aluviales en llanuras de inundación. Como se verá, en caso de tener grandes cargas se hace obligatorio una cimentación profunda, siendo el criterio económico el que determinará la elección entre pilotes y micropilotes, pues ambas soluciones se presentan como válidas obteniendo la relación diámetro/profundidad necesaria en función de la superestructura.

1 INTRODUCCIÓN

En la depresión de Granada y en la localidad de Peligros coinciden tres factores de evidente riesgo: El suelo del aluvial de la depresión tiene un nivel freático casi en superficie, el suelo está constituido por un limo de baja calidad con posibles problemas de licuefacción dada la alta sismicidad de la zona, la mayor de España, y las cargas de la superestructura eran

importantes. Presentamos un estudio de viabilidad desde la comparación de resultados de la cimentación resuelta con solución de tipo superficial, semiprofunda y profunda con la presentación de unos ábacos de triple entrada, que entendemos pueden ser de interés para el uso de los proyectistas en los estudios de viabilidad, ya que se presentan los resultados en forma convencional.

En otro orden de ideas se presenta un estudio comparativo entre el borrador del Ministerio de Fomento para el cálculo y diseño de micropilotes inyectados y el método de Bustamante, que tradicionalmente se ha venido usando desde el año 1988. En este análisis se ponen en evidencia las similitudes de resultados así como la introducción de un tercer tipo de micropilote (el IR) que aún no se ha popularizado dentro de la clase profesional.

2 MARCO DE REFERENCIA

La obra que se ha estudiado se encuadra en la provincia de Granada, dentro del área metropolitana de la capital granadina, bajo de denominación de Vega Baja del Genil. Se caracteriza ésta por presentar una acumulación de más de 250 m de espesor de sedimentos de tipo aluvial, formados principalmente por materiales postorogénicos, destacando en el entorno de la estructura una formación de limos arcillosos con algunas intercalaciones arenosas de baja calidad geotécnica.

3 DATOS DE PARTIDA

3.1 GEOTECNIA DE LA CIMENTACIÓN

Tras el reconocimiento de campo pertinente para la caracterización de los materiales y los correspondientes ensayos de laboratorio, se concluyó con la aparición de dos capas. La primera de 2,5 m de potencia formada por rellenos antrópicos y suelo vegetal despreciable en el cálculo. La segunda formada por limos arcillosos definidos en la tabla adjunta. Es de destacar la influencia del nivel freático muy superficial, oscilando entre los 4 metros de profundidad para la época estival y los 3 metros tras el periodo de lluvias. Además, este problema se agrava con el peligro de licuefacción, ya que atendiendo a la NCSE-02 nos encontramos en una zona de alta sismicidad, siendo la aceleración básica de 0,23g.

CARACTERIZACIÓN LIMOS ARCILLOS	
Cohesión (Tn/m ²)	1,5
Ángulo de rozamiento interno (°)	17
Densidad sumergida (Tn/m ³)	1,2
Densidad húmeda (Tn/m ³)	1,8
N _{SPT}	12

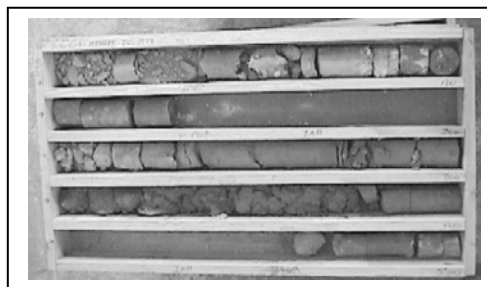


Figura 1: Detalle de los materiales

3.2 CARGAS DE LA SUPERESTRUCTURA

La obra diseñada consiste en la cimentación de estribos para estructuras en viales. Las cargas de cálculo arrojaron esfuerzos importantes, sobre todo para el tipo de terreno que ha quedado descrito anteriormente. Dado que éste no es el objeto primordial de la presente comunicación, sólo damos un resumen de los esfuerzos transmitidos a la cimentación:

ESFUERZOS A CIMENTACIÓN	
Axil (Tn)	355
Momento flector (m*Tn)	59
Cortante (Tn)	24

4 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

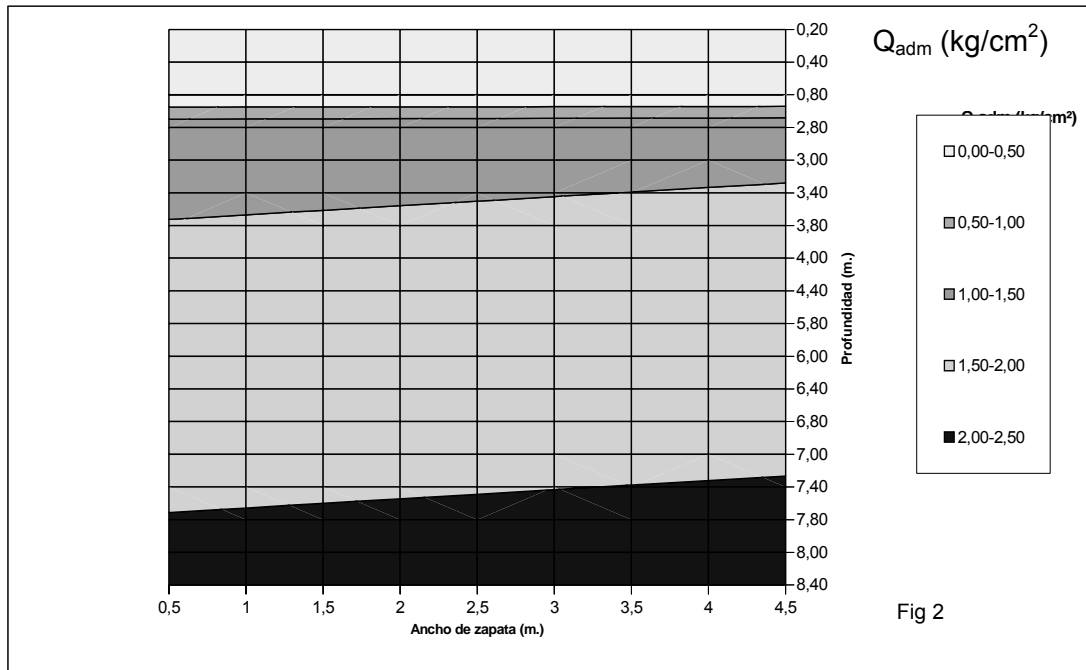
En primer paso en el estudio de la cimentación pasa por un estudio de viabilidad con un análisis multicriterio a la hora de definir la solución óptima. Para este caso concreto, la elección de la solución se basa en cuatro puntos fundamentales: Resistencia mecánica y estructural del elemento, compatibilidad de asientos, procedimiento constructivo y valoración económica. Dada la lógica brevedad impuesta sólo nos ceñiremos a los dos primeros puntos. Para ello el estudio se realiza para cimentaciones superficiales, semiprofundas y profundas, en sus diferentes tipologías.

4.1 SOLUCIÓN MEDIANTE ZAPATA CORRIDA

Se trata de la alternativa que se plantea como cimentación superficial. El factor fundamental a la hora del dimensionamiento es el ancho de la misma. A continuación se resume esquemáticamente el cálculo del mismo, para lo que se ha utilizado la teoría de Terzaghi

para rotura y la teoría de Steinbrenner para asientos, viniendo la limitación por distorsión angular, que queda fijada en un asiento diferencial de 1.33 cm.

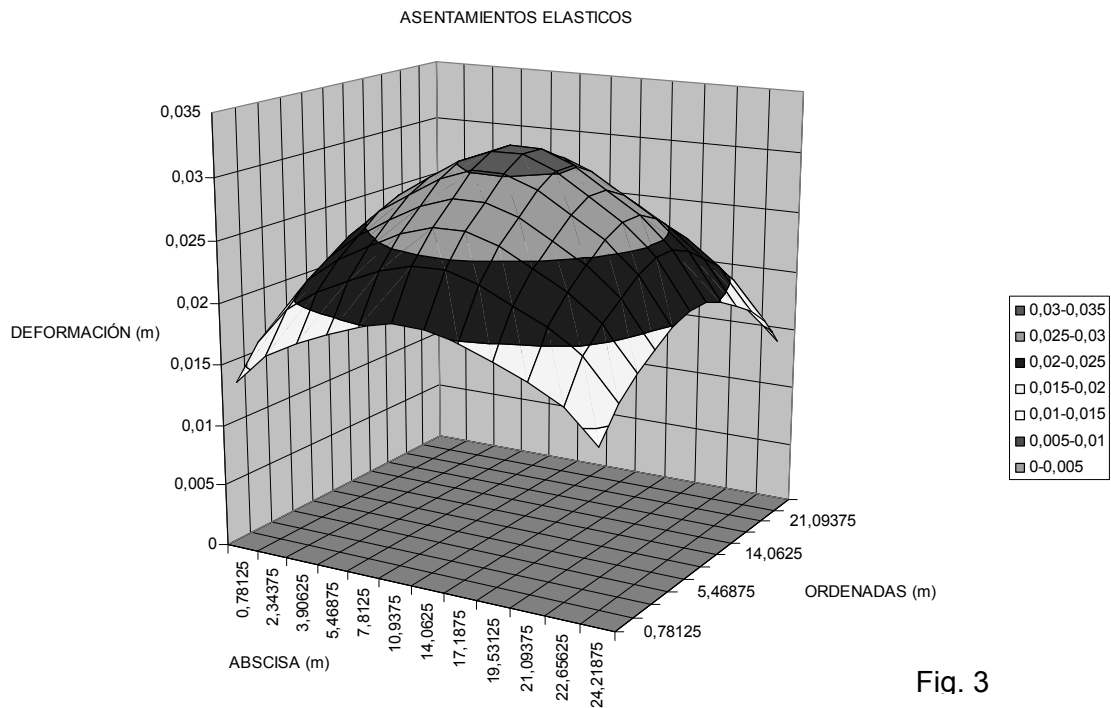
Gráficamente tenemos por la teoría de Terzaghi el siguiente modelo:



En cuanto a los asientos, se resumen en la siguiente tabla:

Asiento admisible cm	Asiento adoptado cm	Ancho de zapata		
		1,0 m.	1.5 m	2,0 m
2,5 - 4,0	3	1.92	1.49	1.27
3,5 - 5,0	4	2.56	1.99	1.69
2,5 - 6,5	4	2.56	1.99	1.69
2,54	2,54	1.63	1.27	1.07
1.33	1.33	0.85	0.66	0.56
Presión admisible kg/cm²				

A la luz de los datos obtenidos hemos de descartar la solución mediante viga corrida debido a las bajas tensiones admisibles obtenidas, tanto por criterios de hundimiento como de asientos.



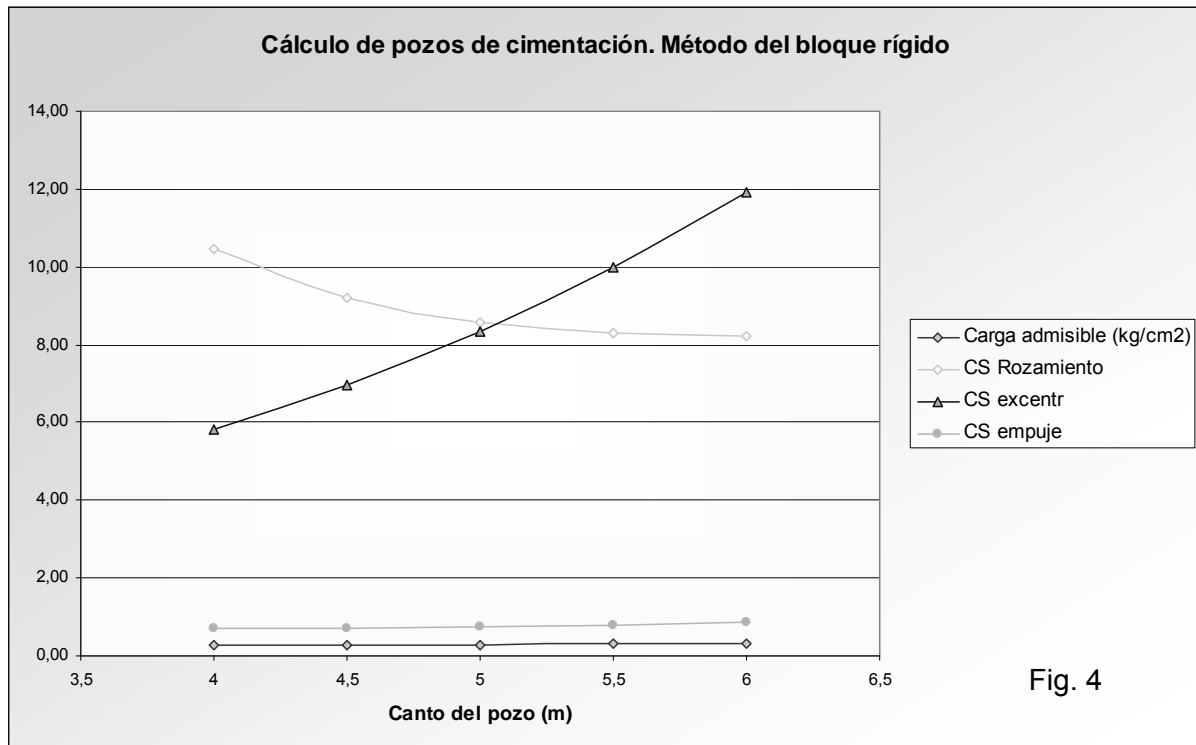
4.2 SOLUCIÓN MEDIANTE POZOS DE CIMENTACIÓN

Los pozos de cimentación responden a la solución mediante cimentación semiprofunda. La teoría empleada, previa comprobación de sus hipótesis de partida es la del bloque rígido. Para ello se hace un cálculo simultáneo para los esfuerzos axil, cortante y flector, suponiendo dos terrenos con comportamiento elástico de tipo Winkleriano sin rigidez transversal.

La comprobación de los mimos se hace en base al coeficiente de seguridad de cinco puntos principales:

1. En primer lugar el rozamiento de la base del pozo con el terreno ha de ser mayor que el cortante que transmite la superestructura.
2. La tensión vertical máxima en la base de la cimentación será menor que la tensión admisible del terreno.
3. Suponiendo la teoría, la excentricidad de la carga vertical debe caer dentro del núcleo central de la sección.
4. El desplazamiento horizontal en cabeza está limitado (normalmente de media a una pulgada).
5. La presión horizontal máxima en el fuste del pozo será menor que la resistencia a empuje pasivo capaz de movilizar el terreno.

Con estos condicionantes, los resultados obtenidos para un pozo de dimensiones en planta cuadrangular de 3 m de lado son:



Como se observa, a pesar de tomar un pozo de considerables dimensiones estamos por debajo del coeficiente de seguridad mínimo adoptable, por lo que se descarta esta opción dadas las altas tensiones que se alcanzan en punta. Por tanto, la solución pasa por una cimentación profunda.

4.3 SOLUCIÓN MEDIANTE PILOTES

Los pilotes son elementos de cimentación de considerable esbeltez, es decir, gran longitud comparada con su sección transversal. Pueden ser hincados u hormigonados en una cavidad abierta previamente en el terreno. Así, en una primera clasificación muy básica, los sistemas de pilotaje más usados en la actualidad son:

1. Pilotes hincados prefabricados:
 - a. De hormigón.
 - b. Metálicos (perfiles laminados, tubos huecos o rellenos, etc).

- c. Tubulares de hormigón armado o pretensado.
2. Pilotes hormigonados in situ:
- a. Hinca de una entubación recuperable con un azuche o tapón perdido en la punta. Hormigón vertido o apisonado.
 - b. Perforados con cuchara de hélice, cabeza rotativa, etc, al abrigo o no de una entubación recuperable. Hormigonado con tubo tremie desde el fondo.
 - c. Barrenados, introduciendo un mortero a presión por el eje de la hélice que extrae el terreno y contiene la cavidad. Las armaduras se introducen con el mortero fresco.

La utilización de uno u otro tipo de pilote requiere la ponderación de diversos factores dependientes del terreno, tipo y tamaño de obra, condiciones del nivel freático, etc. En nuestro caso, y dada la proximidad de cimentaciones próximas, se estudia la solución mediante pilotes perforados, ya que el golpeo de la hinca produciría patologías en las edificaciones próximas a la cimentación que se proyecta.

En primer lugar se procede al cálculo estructural del elemento, para lo que se utilizan las recomendaciones de Rodríguez Ortiz ampliamente sancionadas por la práctica, de bastante similitud con las establecidas en la normativa vigente, la EHE. Así pues, su valor viene dado por:

$$T_e = \alpha * f_{yk} * S_a + \beta * f_{ck} * S_h + \chi * f'_{yk} * S_c$$

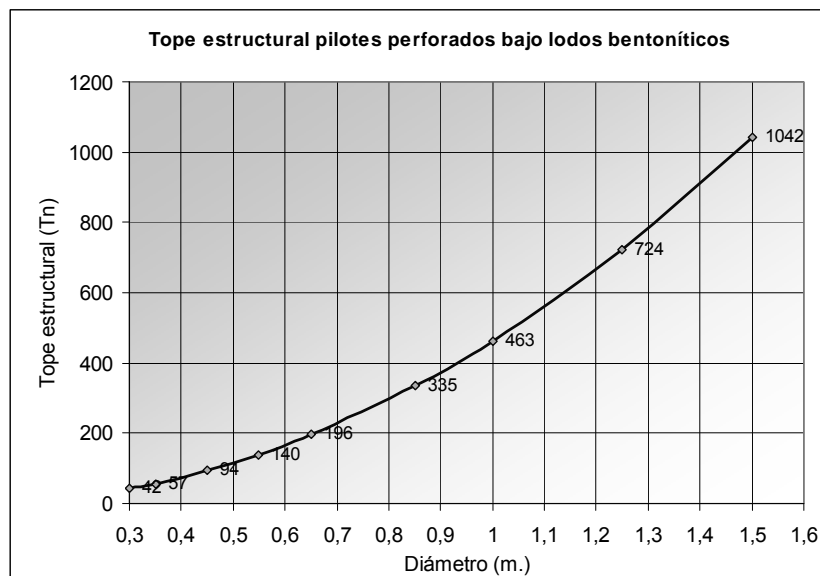


Fig. 5

En segundo lugar se obtiene la carga de hundimiento y la carga admisible para los diferentes diámetros. Para ello se procede mediante el método de los penetrómetros y el método de los materiales de transición. Seguidamente, se resume el cálculo citando expresamente los coeficientes de seguridad adoptados.

La expresión general de la carga de hundimiento es, según la teoría de capacidad portante:

$$Q_h = A_p * r_p + A_f * r_f = (\sigma'_o * N_q + C' * N_{cp}) * A_p + K_s * \bar{\sigma}_o * tg \delta * A_f$$

El factor de seguridad que se emplea en el fuste es de 2, mientras que la desconfianza en la punta es mayor y sube hasta un coeficiente de seguridad 3. Tanto r_p como r_f aumentan con la profundidad pero no indefinidamente, ya que existe una profundidad crítica D_c a partir de la cual se estabilizan. Esta profundidad viene a ser de unos 20 diámetros.

Si realizamos el cálculo por el método de los penetrómetros, tomaremos un coeficiente de seguridad de 3, obteniéndose en ambos casos valores similares. Con todo ello se tienen los siguientes resultados:

Como se puede ver en el gráfico de la página siguiente, esta alternativa soluciona la cimentación con varias posibilidades. Tras un estudio económico, la mejor solución era la de tres pilotes de 1000 mm de diámetro unidos con un encepado rígido.

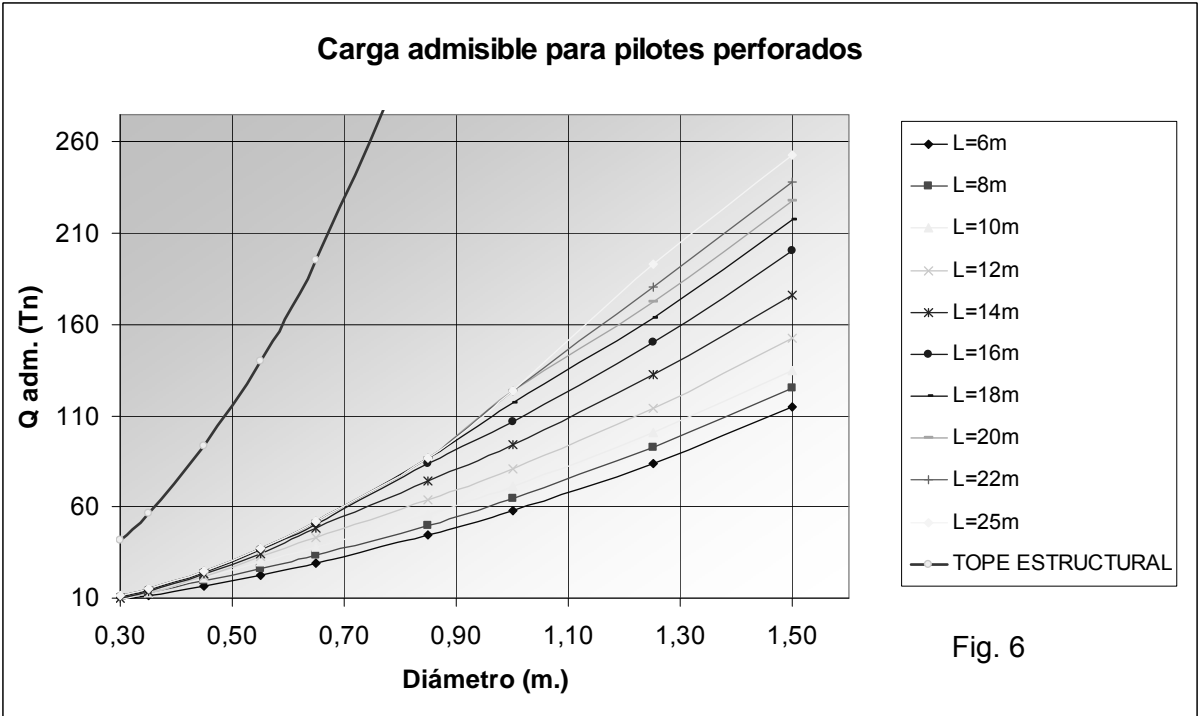


Fig. 6

En otro orden de ideas, es de especial importancia el hecho de que absolutamente todos los pilotes se encuentran muy por debajo de la línea que marca el tope estructural en función de su diámetro. Es por ello que se entiende esta alternativa como costosa debido al sobredimensionamiento al que se ve arrastrado el material de fabricación del pilote, aunque geotécnicamente sea excelente.

4.4 SOLUCIÓN MEDIANTE MICROPILOTES

Por último, terminando con las cimentaciones profundas se procede al diseño de micropilotes, para lo que se estudian diversas tipologías dependiendo de su diámetro de perforación y de la camisa de armado, que se comercializan con la siguiente nomenclatura (añadiendo la calidad del acero): 150/90/7, 180/114/9, 250/200/13, 300/250/15.

De la misma manera, se puede dividir también en función del sistema de inyección que se emplee. Atendiendo a la clasificación propuesta por Bustamante a principios de la década de los 80, dividimos entre IGU e IRS. Sin embargo, el nuevo borrador del Ministerio de Fomento introduce un nuevo sistema, el IR, que queda en la frontera entre los anteriores.

Así pues, el primer proceso consiste en obtener el tope estructural de los micros. Bustamante se apoya en las hipótesis generales de la resistencia de materiales y la teoría de Von Mises despreciando la contribución de la lechada, mientras que el borrador del Ministerio, para compresión, adopta el cálculo propuesto en la EHE añadiéndole los factores RC, R, F que introducen coeficientes en función de la corrección por pandeo, por el tipo y ejecución de obra. La formulación del Ministerio para el tope estructural a compresión es:

$$T_{Ed} = \left(\frac{0.85 * A_C * RC}{1.5} + \frac{A_S * f_{yk}}{1.15} + \frac{A_P * f_{yk,P}}{1.15} \right) * \frac{R}{1.2 * F}$$

mientras que para tracción es:

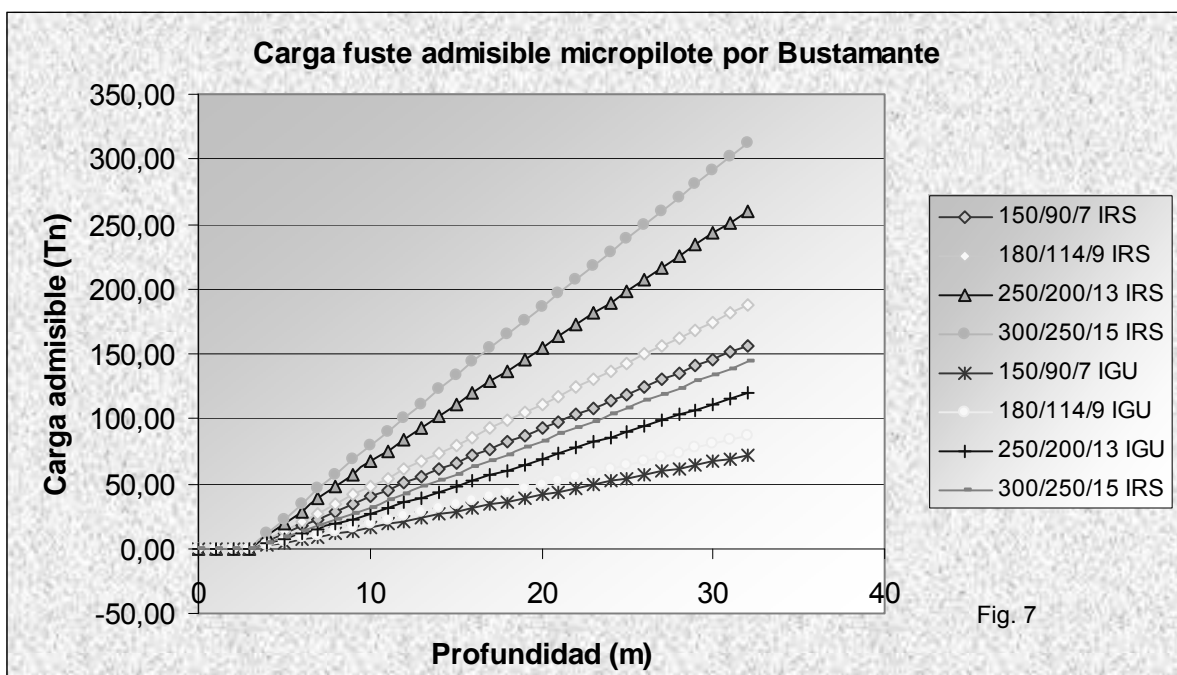
$$T'_{Ed} = \left(\frac{A_S * f_{yk}}{1.15} + \frac{A_P * f_{yk,P}}{1.15} \right) * \frac{F_u}{1.1}$$

Adoptando los valores tabulados para la cimentación que se estudia, se tiene el siguiente cuadro comparativo. Como se puede ver, los valores para micros sometidos a compresión

son similares en ambos casos. Sin embargo, para micros solicitados a tracción, la propuesta del Ministerio duplica la capacidad con respecto a los valores procedentes de Bustamante.

Tope estructural	150/90/7		180/114/9		250/200/13		300/250/15	
	Bustam	Minist	Bustam	Minist	Bustam	Minist	Bustam	Minist
Tracción	37	74	61	120	156	308	226	446
Compresión	47	46	76	73	195	176	282	255
Cortante	23	23	38	36	97	88	141	127

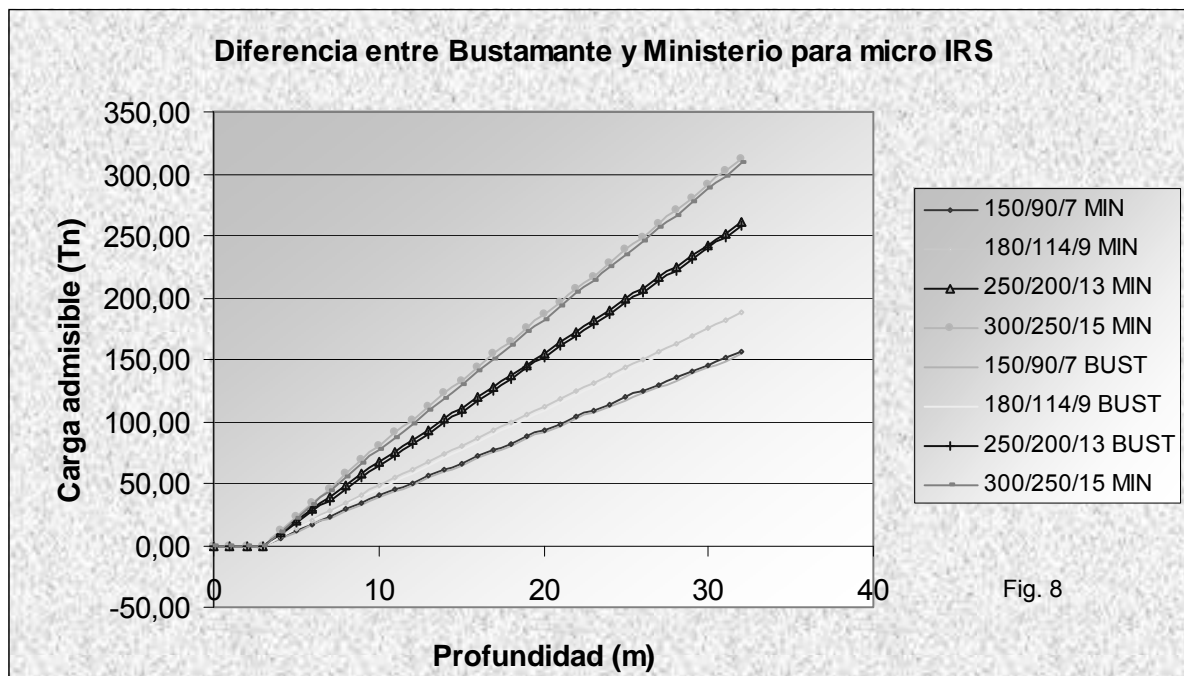
El siguiente paso a realizar es el cálculo geotécnico de la pieza, donde con el modelo de Bustamante se obtienen los siguientes resultados para cada tipo de micropilote estudiado.



En este caso vemos que para los micros de menor diámetro se supera el tope estructural en profundidad, por lo que se está optimizando la sección del material. Es por ello que esta solución también se plantea como válida con 5 micropilotes IRS 180/114/9 inyectados 15 metros, de los cuales los 3 primeros se inyectarían en IGU para no romper el terreno.

Si adoptamos el modelo de cálculo definido en el borrador del Ministerio obtenemos valores similares a los mostrados anteriormente con la teoría usual establecida. Esto ocurre para las tipologías IGU e IU y la IRS definidas los documentos de referencia. El nuevo sistema que introduce el Ministerio, el IR, toma valores intermedios entre ambos, aunque dependiendo de la litología del terreno se aproxime más a un tipo de los anteriores u otro.

Como se observa en la gráfica siguiente, apenas existen diferencias significativas entre ambos sistemas de cálculo, por lo que su uso, al menos en este tipo de materiales es indiferente.



5 CONCLUSIONES

Tras el estudio de alternativas para estribos de obras lineales con grandes cargas, desde el punto de vista geotécnico, para materiales limosos de baja compacidad ($N_{SPT} \approx 12$) y bastante somero tales como los estudiados, obtenemos las siguientes conclusiones:

1. No se recomiendan cimentaciones superficiales o semiprofundas, tipo zapatas corridas o pozos de cimentación respectivamente, dada la baja capacidad portante del terreno. Además, el criterio de carga admisible por asientos es más restrictivo que el criterio por rotura para las tipologías anteriores.
2. Se tiene que optar por cimentaciones profundas en cualquier caso.
3. Una cimentación por pilotes de gran diámetro cumple los criterios resistentes y deformacionales. El inconveniente de la misma es que la carga que transmite al terreno es muy inferior a su tope estructural, por lo que se sobredimensiona obligatoriamente el elemento y encarece el sistema.
4. Si el terreno no aumenta su competencia con la profundidad obliga a adoptar grandes longitudes para pilotes de gran diámetro.

5. La solución por micropilotes cumple técnicamente con las necesidades del diseño, pudiendo movilizar en el terreno resistencias similares a su tope estructural, por lo que se optimiza la sección.
6. Como es natural, será el criterio económico el que desequilibre la balanza entre las dos alternativas que son válidas con respecto al cálculo.

BIBLIOGRAFÍA

A. BENSLIMANE, I. JURAN AND D. A. BRUCE (1997). " Group and Network Effect in Micropile Design Practice". XIV International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. . Hamburg, Volume 2. pp. 767-770.

BUSTAMANTE, M. and DOIX, B., (1985). "Une Méthode pour le Calcul des Tirants et des Micropieux Injectés," Bull. liaison laboratoire Ponts et Chaussées, 140, nov-déc, p. 75-92.

COYLE, H. M. and REESE, L. C. (1966). Load Transfer For Axially Loaded Piles In Clay. Journal Of The Soil Mechanics And Foundation Division, ASCE, Vol. 92, No. SM2, 1-26.

HERNÁNDEZ DEL POZO, J.C. ET AL, (2003). "Cimentaciones Profundas. Procedimientos de Ejecución y Cálculo". Área de Ingeniería de la Construcción. Área de Ingeniería del Terreno. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Granada.

HERNÁNDEZ DEL POZO, J.C. ET AL, (2002). "Micropilotes Inyectados". Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Granada.

HERNÁNDEZ DEL POZO, J.C., RUBIO F. ET AL. (2004). "Problemas resueltos e cimentaciones profundas". Inédito.

MASCARDI, C. A., (1982), "Design Criteria and Performance of Micropiles," Symposium on Soil and Rock Improvement Techniques including Geotextiles, Reinforced Earth and Modern Piling Methods. December, Bangkok, Paper D-3.