

ESTADO ACTUAL DE LAS CIMENTACIONES CON PILOTAJES

Por FERNANDO OLIVEROS RIVES

Ingeniero de Caminos.

Se refiere el autor a la reunión celebrada en Estocolmo entre especialistas en proyectos de cimentaciones con pilotes, que ha permitido pulsar el desarrollo de los trabajos de esta interesante técnica, y proponer futuras reuniones que tendrán lugar en París el próximo año, con motivo del V Congreso de Mecánica del Suelo.

Se ha celebrado recientemente un Symposium en Estocolmo sobre el proyecto de cimentaciones con pilotes, al final de las reuniones de la A.I.P.C.

Este cambio de impresiones entre los especialistas resultó muy interesante, y la concreción de los temas tratados aumentó la importancia de la reunión, pues permitió profundizar sin limitaciones en el campo de esta materia.

La primera parte se destinó a un estudio de las normas existentes en algunos países, vigentes para la ejecución y proyecto de pilotajes, proponiéndose algunas modificaciones substanciales; en la segunda parte se estudió el proyecto, poder de carga y carga admisible para un pilote, tanto para aquellos que resisten por punta, por fricción solamente o por actuación de ambos efectos, y en la tercera parte se analizó la capacidad de carga y deformación producidas por un grupo de pilotes extendiéndose sobre los estados de rotura.

Los problemas de pilotaje son, como ya se sabe, de gran complejidad y la solución de tales cimentaciones requiere un estudio analítico que permita fijar e incorporar en el proyecto las características geomecánicas de los suelos que definan el problema. Ocurre que problemas resueltos, bien en modelo reducido o tamaño natural, sólo permiten un pequeño campo de aplicación, ya que las perspectivas de aplicación resultantes son, en general, de corto alcance, y nuevamente debemos comenzar otras experiencias si se quiere resolver con precisión la cuestión siguiente. La teoría nos deja desamparados ante una fría realidad y la labor se hace más ardua. El campo semiempírico es el característico de estos problemas; se inician experiencias guiadas por unas teorías que, a su vez y al final, se modifican por los resultados de aquéllas.

Aprovecharemos para decir que debemos profundizar cada vez más en los problemas que plantean los pilotajes, pues aspectos que antes no se tenían en cuenta para su proyecto son ahora minuciosamente analizados. Citaremos algunos aspectos frecuentemente eludidos:

Conviene estudiar estáticamente el macizo de encepamiento de las cabezas, ya que su deformación en el centro podría someter a los pilotes correspondientes a sobretensiones lejanas del cálculo. Conviene tener en cuenta un hecho que con frecuencia se olvida, y es que en los sistemas hiperestáticos se parte del supuesto de que los pilotes son elásticos y que no existe influencia del suelo sobre sus deformaciones axiales, pero en ocasiones tal circunstancia debe tenerse muy en cuenta, el acortamiento elástico del pilote puede producir momentos importantes en las vigas o zapatas de arriostramiento. Habrá que decidir cuál va a ser el orden de hincas de un pilotaje, pues las características geomecánicas del suelo, en cada caso, serán sensiblemente diferentes y en ocasiones nos permitirá hacer economías. Es de gran interés el efecto de densificación que podemos producir en el suelo por percusiones de hincas. Las componentes horizontales nos plantean serias dificultades ante la falta de aptitud de las piezas prismáticas que manejamos para sufrir flexiones, y las soluciones tienen que ir orientadas hacia los pilotes inclinados, o los pretensados que, actualmente ofrecen un arma auxiliar de gran valor. Los grupos de pilotes deben ser estudiados analizando su actuación bajo dos direcciones, ya que las excentricidades, esfuerzos de vientos, empujes del suelo y demás efectos, lo van a someter realmente a resistir un estado de tensiones más complejo que el proyectado.

Debemos continuar orientando el cálculo hacia los estados de rotura. Si los materiales que utilizamos para construir las cimentaciones profundas no son elásticos, ni los suelos en los que confiamos las cargas tampoco, será preciso aplicar el campo plástico que, por otra parte, nos proporcionará más economía.

En fin, para qué extendernos en la cuestión, si lo que únicamente interesa es llamar la atención sobre aquellos temas que por considerarse en ocasiones de segunda derivada, parecían carecer de importancia. Naturalmente, todo ello nos obliga al cálculo más complejo, dificultades que pueden quedar en cierto modo paliadas con la introducción de los ordenadores electrónicos en la resolución práctica de estos problemas.

El Symposium trató en su primera parte, como se ha dicho, sobre normas. Se han desarrollado con gran profusión en diversos países reglamentos o códigos de la construcción, que incluyen abundantes normas referentes a esta materia. Son numerosas las tentativas de propuestas que se hacen y que son incluídas, posteriormente, después de haber sido sancionadas por la práctica. Sería interesante que se revisaran perió-

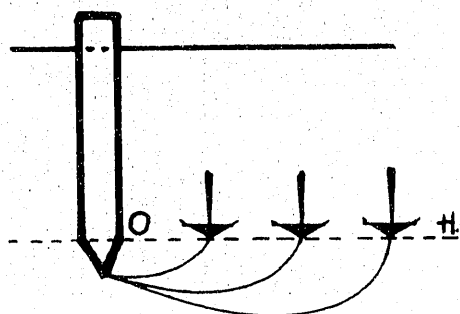


Figura 1.ª

dicamente los principios de normas que existen en nuestro país, recopilados por la Sociedad Española de Mecánica del Suelo y Cimentaciones, y que se efectúase una ampliación aprovechando nuestros progresos y los de otros países en este sentido, pues la técnica del pilotaje está ya muy extendida en España y creemos que se presta poco apoyo técnico a la masa no especialista que circunstancialmente trata estos temas.

Tenemos que manifestar nuestro desacuerdo con las especificaciones húngaras, que admiten cargas horizontales sobre pilotes verticales hasta del 20 por 100 de la carga normal. Como se comprenderá, dada la sección resistente del pilote, poco se puede esperar de la misma, para soportar flexiones, por lo que nos parece dicho valor excesivo, a no ser que se tomen medidas especiales para absorber tales flexiones.

Respecto a la segunda parte del Symposium, y en relación con el empuje de suelos, diremos que el desarrollo de los estudios para determinar su magnitud, no nos ofrece unos resultados definitivos que permitan fijar posiciones definidas en el problema; Bergfelt propugna se efectúen intentos que podrían realizarse en el laboratorio, y en verdadera magnitud, para conseguir compendiar unas especificaciones prácticas que dieran el valor probable de la intensidad y duración del empuje, así como posibilidades de utilizar sus efectos de compactación, o corrimiento de los suelos. Todo ello permitiría prever un placentero futuro a la técnica del pilotaje y su actuación ante tales efectos.

Nishida ha estudiado las modificaciones que se introducen en los estados de tensión de los suelos ya cohesivos, ya sin cohesión, como consecuencia de la

hinca de pilotes. Sus resultados matemáticos quedan de acuerdo con las experiencias de Whitaker, de 1957.

Sigue latente el problema de reparto de la carga entre la punta y el fuste de un pilote, alentado comercialmente en uno u otro sentido por las Empresas correspondientes. La capacidad portante de la punta depende de la fricción lateral y, a su vez, esta actuación depende de aquélla; no existen individualidades en este campo resistente y el problema sigue sin resolverse. Los ensayos, principalmente con el aparato holandés de penetración modificado, dan orientación acerca de una y otra resistencia, pero su aplicación al pilote, pieza que ha de resistir simultáneamente ambos efectos en sus condiciones características, no ha sido determinado, teniendo que ir al tamaño natural para resolver dicho problema de una forma aceptable.

En cuanto a la aplicación del método basado en los ensayos de penetración estática, deberá ir orientado por la teoría, lo cual servirá a su vez para determinar la forma y alcance de la validez de las hipótesis fundamentales admitidas; hasta hace pocos años se suponía que las curvas de deslizamiento quedaban limitadas al plano horizontal (fig. 1.ª), pero actualmente se admite, de una forma general, que dichas curvas continúan según espirales logarítmicas, volviéndose hacia el pilote, como se puede observar en la figura 2.ª. La distancia RQ , llamada altura crítica, define en el suelo una zona en estado de equilibrio plástico correspondiente al esfuerzo en la punta, por lo que Elahib aconseja un coeficiente de incremento triaxial del orden de 1,3 a 1,7.

Respecto a los estados estáticos de penetración, L'Hermier mantiene que la resistencia en la punta medida con el penetómetro y aplicable a un pilote

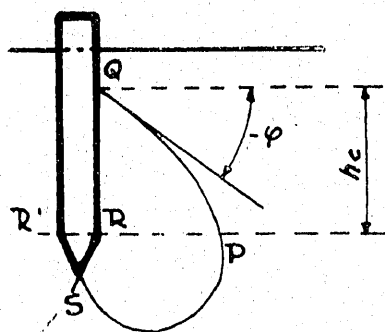


Figura 2.ª

real, es muy superior a la que se deduciría de las fórmulas clásicas, basadas en el ángulo de rozamiento interno medido en el laboratorio por medio del aparato triaxial; sostiene que esta resistencia no se alcanza hasta que el pilote quede empotrado una altura de $4 \text{ ó } 5 \phi$ en el estrato resistente, denominada, como se ha dicho, altura crítica. Cuando aquella altura posee un valor inferior a ésta, las curvas de deslizamiento

no se pueden desarrollar en su totalidad y la resistencia en la punta no alcanza su valor máximo.

Por lo que se refiere a la resistencia por fricción lateral, el valor deducido con el penetrómetro es inferior al que se deduce del cálculo de empujes de tierras, por lo que se comprueba que estos cálculos siempre dan valores falsamente conservadores.

Todavía ha sido presentada otra nueva fórmula de capacidad portante de pilotes hincados resistiendo por fricción en áreas sin cohesión, por Szechy.

de ningún modo a la punta, no deja de ser una experiencia muy interesante, que corrobora las elevadas tensiones que se originan en la base de un pilote, según indicaba Meyerhof, como consecuencia del estado de constricción en que el suelo se encuentra en dichas circunstancias.

Respecto al problema de pandeo, que, como se sabe, raramente se manifiesta en la práctica, se ha hecho una experiencia que ha consistido en someter a un pilote de hormigón armado cuya esbeltez era 170,

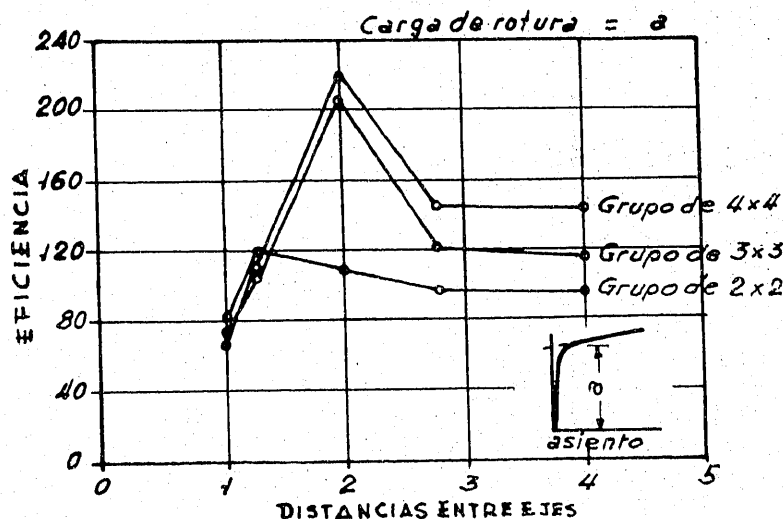


Figura 3."

Lee estudia la resistencia a la penetración de los pilotes de hormigón por la teoría de ondas, y deduce una cifra interesante de la duración del golpe sobre un tipo normal de sombrerete, y que damos a título de orientación, cuyo valor es de 1/50 de segundo; cuando el sombrerete estaba muy golpeado se llegó a 1/120 de segundo. La tensión máxima en la cabeza del pilote se produce alrededor de 1/200 de segundo después del impacto, y como la velocidad de la onda es de unos 3.600 m./seg. en el hormigón, la onda reflejada en la base vuelve a la cabeza antes de que el impacto cese, en el caso de pilotes de longitud menor que 10,5 m. La continuación de estos estudios ofrecen interesantes perspectivas para enfocar con más conocimiento de causa el problema de la hinca.

Tenemos que destacar por su importancia, la prueba de carga referida por Bergfelt, efectuada sobre un pilote de hormigón armado formado por varias partes empalmadas, que fué hincado a una profundidad de 100 m., para resistir por punta sobre roca, con una sección transversal de 420 cm.², y que fué cargado con unas 210 Tm., lo que produjo una carga de trabajo de 500 Kg./cm.², sin llegar a la rotura. Con las reservas consiguientes de que el citado pilote pueda ser considerado como tal, en toda su longitud, ya que nuestra opinión es que el efecto de la carga no llegó

a una presión de 300 Kg./cm.², sin que se haya manifestado el menor síntoma de pandeo en un suelo relativamente compacto.

En cuanto a la tercera parte del Symposium, respecto a los grupos de pilotes, se han hecho grandes progresos en estos tres últimos años, en que se han variado fundamentalmente conceptos que podríamos llamar clásicos. Fué Kezdy, como se sabe, en el IV Congreso de Londres (1957), quien expuso el resultado de sus ensayos, así como Whitaker, en dicho año, y posteriormente Stuart, Meyerhof y otros. La idea de que la carga que se le asigna a un pilote formando parte de un grupo, debía ser inferior a la que resistiría como un pilote fuera del grupo, ha sido modificada, y actualmente se opina lo contrario, es decir, que el grupo de pilotes, en las condiciones en que se efectuaron los ensayos y que después veremos, resiste una carga mayor que la correspondiente a uno individual multiplicado por el número que forma el bloque.

El estudio del grupo se ha concretado y nuevos índices han servido para caracterizarlo; los conceptos de "eficiencia", "relación de asiento", etc., ofrecen una base comparativa para confrontar los resultados

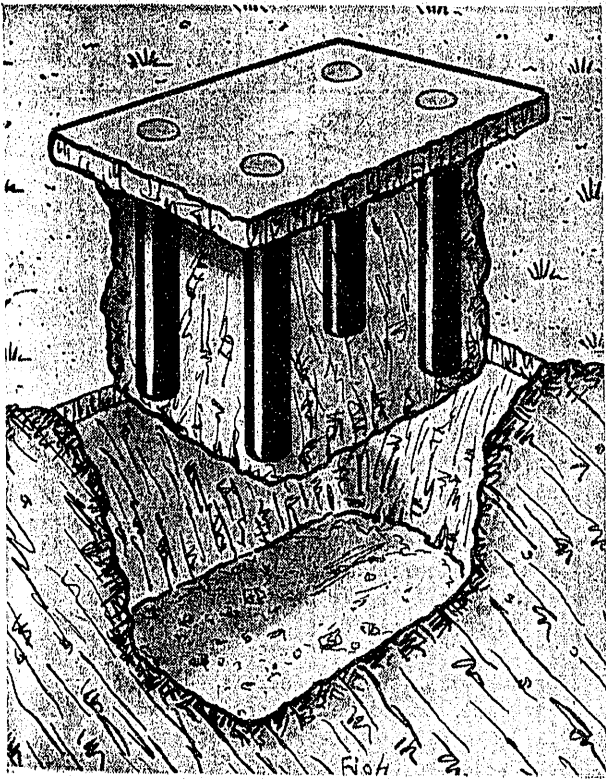


Figura 4.^a

de los diferentes investigadores, bien en el laboratorio, bien en la verdadera magnitud.

En suelos sin cohesión, Stuart da cuenta de unas pruebas hechas en la Universidad de Belfast sobre grupos de modelos en arena, y para una separación crítica próxima a 2ϕ , ha obtenido que la capacidad de carga del grupo es mayor que la suma de las capacidades de carga de los pilotes individuales. Una primera explicación del fenómeno podía ser la actuación de un efecto silo entre las partículas del suelo que circunda a los pilotes, las cuales pondrían en jue-

go un incremento de sus fuerzas de rozamiento y cohesión. Este efecto sería originado por las coacciones que se crean en el suelo, como consecuencia de la situación y movimientos de los pilotes. El valor máximo coincidiría con la separación citada de 2ϕ ; una menor separación produciría estados de rotura, y separaciones mayores una falta de colaboración de tipo arco. La separación de 6ϕ permite a los pilotes comportarse ya prácticamente como independientes.

Estos ensayos están de acuerdo con los realizados por Whitaker en 1957 y, posteriormente, por este autor y Fleming, efectuados sobre suelos cohesivos. La máxima resistencia del grupo para análogas condiciones de carga se manifestaba cuando la separación era también próxima a los 2ϕ (fig. 3.^a).

Whitaker ha encontrado dos formas de rotura perfectamente características en los grupos de pilotes: la primera, que podemos llamar rotura tipo de bloque, se manifiesta cuando la separación entre ejes de pilotes es próxima a 2ϕ y en él se observa que el grupo se comporta como formado por un bloque compacto de suelo reforzado por los pilotes, y la superficie en que se produce el esfuerzo cortante a rotura es la superficie envolvente del grupo; cuando dicha circunstancia no se presenta, se manifiesta el otro tipo de rotura, en que este sentido de colaboración de conjunto desaparece. Unos estados de rotura parecidos se producían cuando se procedió a la extracción correspondiente de los grupos.

Como vemos, existe una cierta concordancia entre los comportamientos de los suelos cohesivos y no cohesivos sujetos a cargas transmitidas por grupos de pilotes, que puede servir de guía para realizar nuevos ensayos que permitan admitir como definitivos tan interesantes resultados.

Como resumen, diremos que esta Reunión ha sido particularmente significativa, ya que ha servido para pulsar el desarrollo de los trabajos de tal especialidad ante las futuras reuniones, que tendrán lugar en París el próximo año, con motivo del V Congreso de Mecánica del Suelo.