

# COMENTARIOS SOBRE ARTICULOS PUBLICADOS EN MESES ANTERIORES

## Comentario al artículo "Fórmulas de hinca dinámica", de H. Bolomey Frazer (publicado en la Revista de Obras Públicas de diciembre de 1971).

Por MARIO COLL ALAS Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

El Sr. Bolomey hace en su artículo un eficaz estudio de las fórmulas de hinca dinámica y sus acertadas observaciones sobre ellas, contribuyen indudablemente a esclarecer este debatido problema.

Pero me deja la duda de si su planteamiento no llegue a confundir al lector en dos aspectos que estimo básicos:

1. En el estado actual de la Mecánica del Suelo, lo ideal sigue siendo usar todos los recursos y ensayos que nos facilitan el mejor conocimiento del problema planteado. La mayor o menor disparidad de resultados no es una tragedia, sino el lógico resultado de contemplaciones parciales y distintas de un fenómeno tan complejo que, por ahora, no tenemos posibilidad de representarlo matemáticamente.

2. Las fórmulas dinámicas, en su planteamiento teórico, son deficientes y, por tanto, su resultado práctico depende siempre de coeficientes estimativos.

En lo que respecta a la objeción primera, no creo que exista posibilidad de duda, y únicamente, como siempre, es el aspecto económico el que puede exigir que se prescinda de la aplicación exhaustiva de los recursos técnicos existentes.

Empezar por el reconocimiento geológico y geotécnico del terreno, utilizando sondeos S.P.T., muestras inalteradas para ensayos de laboratorio, análisis de aguas, penetrómetros, pruebas de carga, veletas, etc., debe ser obli-

gatorio, y así lo entiende el Ministerio de la Vivienda (Decreto de 11 de marzo de 1971), y tradicionalmente se hace en las Obras Públicas.

Dimensionada la cimentación, en el caso de pilotes hincados, es evidente que sería rechazar una información importante si durante la hinca se prescinde de los datos de penetración reales como comprobación.

Y, finalmente, resultará, cuando sea posible, sumamente interesante hacer pruebas de carga (mejor en un grupo de pilotes que en un pilote suelto).

Cada dato obtenido servirá para corregir hipótesis de partida y centrar coeficientes de forma que al final la dispersión sea mínima y esté dentro del entorno protector del coeficiente de seguridad.

Todo ello sin olvidarse que los suelos deberíamos considerarlos como cosas casi vivas, capaces de moverse, cambiar, ejercer presiones en un sentido y variarlas en tiempos relativamente cortos y por circunstancias que no guardan relación directa con la propia obra que hemos cimentado en ellos.

Respecto de la obtención de las fórmulas de hinca dinámica bastaría recordar que los técnicos aseguran que existen unas 450 diferentes (Chellis menciona 37) para no demostrar excesivo optimismo.

En todas ellas la aplicación se hace menos convincente para los pilotes de grandes dimensiones y de gran longitud que es a lo que se tiende actualmente.

Esto es debido a que los defectos de estas fórmulas se ponen de manifiesto más claramente en estos casos.

Una visión teórica más rigurosa nos lleva, inevitablemente, a considerar la onda de transmisión del impacto.

La mecánica del impacto y la propagación de las ondas del esfuerzo dinámico se expresan por la ecuación:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

donde  $u$  es el desplazamiento de la sección del pilote,  $t$  el tiempo,  $V$  la velocidad de la onda, cuya solución es una función trigonométrica y exponencial.

Cuando el martillo golpea, la fuerza aplicada no se transmite simultáneamente a lo largo del conjunto formado por la sufridora y el pilote. La realidad es que se produce una onda de compresión que se traslada bajando por estos elementos a una velocidad igual a la de la propagación del sonido en los distintos materiales de la sufridora y pilote.

Esta velocidad está definida por la relación

$$V = \sqrt{\frac{E}{m}} \quad (E = \text{módulo de elasticidad}, m = \text{masa}).$$

En el caso del hierro y del hormigón vale  $V = 3.800 \text{ m/seg.}$

La longitud de la onda es proporcional a la duración del impacto y varía entre 15 a 300 m.

La amplitud de la onda es función de la energía recibida y de la longitud de la onda. Esta amplitud determina los esfuerzos máximos a que queda sometido el material de la sufridora y el pilote. Varía normalmente entre 70 y 175 Kg/cm<sup>2</sup>, pero si el impacto es muy breve puede llegar a 300 Kg/cm<sup>2</sup>.

La amplitud va disminuyendo al avanzar, por rozamiento lateral del fuste.

La figura 1 nos muestra el desarrollo de los esfuerzos de hincapie en el desplazamiento de la onda de impacto. En (a) se produce el impacto a través de la sufridora, originando la compresión de la cabeza del pilote. En (b) esta onda se transmite hacia abajo a la velocidad del sonido.

Al llegar a la punta (c), la onda de compresión se refleja y sube hacia arriba. En onda de tracción si el suelo es blando (d). Si el terreno

es duro, la onda de compresión se refleja hacia arriba como onda de compresión (e) y en el instante de reflejarse se suma a la que está bajando.

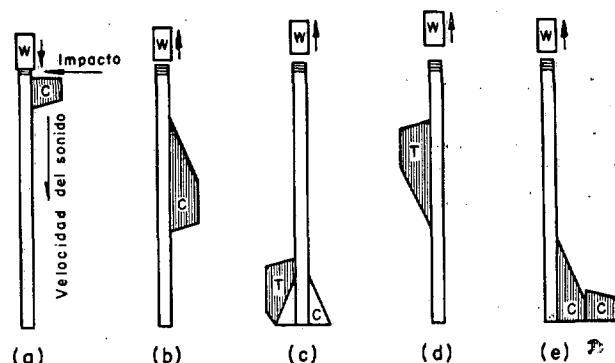


Fig. 1.— Propagación de la onda de impacto.

Se aclara así el peligro de fisuración por tracción (caso d) y el de rotura de la punta del pilote (caso e) por estar sometida a una compresión doble. También como las longitudes de onda pequeña, impacto breve, aumentan estos peligros que se presentan en mayor grado cuando la longitud del pilote corresponde a media longitud de onda.

La figura 2 es el esquema del cálculo por la onda.

La maza y el escudo son elementos pesados y rígidos que se representan por sus pesos  $W_1$  y  $W_2$ .

La sufridora se comporta como un resorte  $K_1$  y el pilote se representa por una serie de pesos y resortes ( $W_3$  a  $W_{12}$  y  $K_2$  a  $K_{11}$ ).

El comportamiento como resorte está definido por  $K = \frac{S E}{L}$ , siendo  $S$  sección,  $E$  módulo de elasticidad y  $L$  longitud del elemento.

Los valores de  $R$  corresponden a las resistencias límites del terreno.

La punta del pilote penetra en el terreno, que primero se deforma elásticamente, hasta que se alcanza la resistencia límite, y se produce entonces una deformación plástica del terreno, que es el asiento permanente, ya que la deformación elástica inicial se recupera al final de este ciclo.

El movimiento de cada elemento se calcula como objetos independientes, como pesos conectados a resortes flexibles.

La energía y la velocidad a que se produce el impacto son los puntos de partida y, por tanto, son las variables más importantes que hay que fijar.

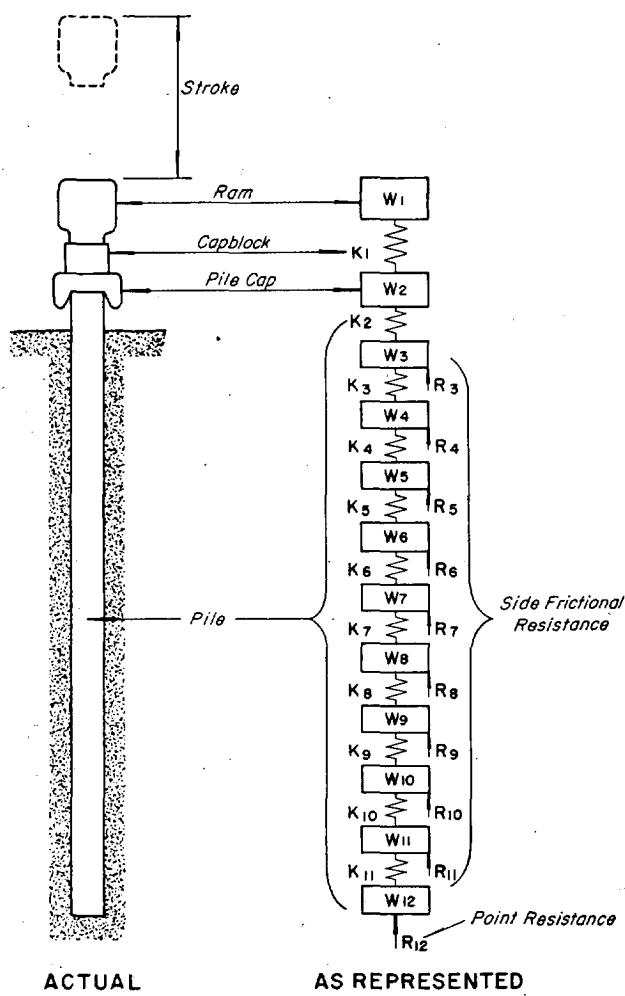


Fig. 2.— Método de representar un pilote para su cálculo por la onda.

Inmediatamente sigue en importancia el comportamiento de la sufridora, que es el primer resorte  $K_1$  que recibe el impacto. Recibe y entrega al pilote la energía transformándola, según su ciclo de histéresis, aumentando la longitud de onda y, por tanto, disminuyendo la amplitud o máxima compresión sobre el pilote. Además, absorbe, con su deformación elástica, parte de esta energía. El coeficiente de restitución "e", cociente de la energía que entrega la sufridora

a la que ha recibido, es muy variable, y también lo es el valor del resorte, según el material y la longitud que tiene. Por ejemplo: Una sufridora de madera de pino de  $L = 10$  cm tiene  $K = 95 \times S$  (Kg/cm) y  $e = 50$  por 100. Otra de madera dura y  $L = 15$  cm da  $K = 550 \times S$  (Kg/cm) y  $e = 50$  por 100, en tanto que otra de mi carta de  $L = 30$  cm da  $K = 1.240 \times S$  (Kg/cm) y  $e = 80$  por 100.

Se comprende así perfectamente la inutilidad de hablar de rechazos sin especificar las características del impacto (onda inicial), las de la sufridora (onda transformada) y las del propio pilote.

También ha quedado aclarado la importancia de la longitud de la onda que recorre el pilote con respecto a la longitud de éste en los fenómenos de reflexión que pueden producir la trituración de la cabeza inferior por compresión o la fisuración del fuste por tracción, según la naturaleza del suelo.

A la vista de la influencia que tienen en la hincada la forma de producirse el impacto y las secciones y materiales de que están constituidos los elementos por donde circula (varillas metálicas de pequeña sección en los ensayos dinámicos, madera, hierro, hormigón armado en los pilotes), y la relación de longitud de onda a la del elemento hincado, se comprende la gran dificultad que encierra la aplicación de fórmulas simplistas y el establecimiento de comparaciones de ensayos.

Con ello, a través del análisis de la segunda objeción, vuelvo a ratificarme en la primera y espero que el Sr. Bolomey estará también de acuerdo.

#### Datos obtenidos en:

Nuevas Técnicas. Cálculo de Pilotes M.V.; Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos, Miguel Forcat.

Revista de la División Mecánica del Suelo y Cimientos ASCE, Civil Engineering.

Smith, 1960, y Anderson, 1971.