

**COLEGIO DE INGENIEROS CIVILES DE COSTA RICA
CONGRESO CIC-2010
SAN JOSÉ, COSTA RICA. OCTUBRE 2010**

**CAPACIDAD DE CARGA EN COMPRESIÓN DE PILOTES HINCADOS POR CALCULOS
TEORICOS, FORMULAS DINAMICAS, Y PRUEBAS ESTATICAS Y DINAMICAS**

*Ing. Luis Osmel Millán Solórzano, Msc. (Cand.)
Millán Ingeniería /Marina Pez Vela, Costa Rica, lmillan@marinapezvela.com*

RESUMEN:

En el presente artículo se discuten diversos métodos para la determinación de la capacidad de carga de pilotes hincados los cuales son usados actualmente ya sea en la etapa de diseño, antes de la hinca, o como comprobación durante o posterior a la instalación de los mismos.

El método teórico se usa para dar las dimensiones a los pilotes durante la etapa de diseño. Para su aplicación se requieren sondeos y pruebas de suelos que permitan establecer un perfil del terreno con parámetros geotécnicos específicos.

Ecuación de onda se utiliza para determinar la idoneidad del equipo de hinca a usar, así como para verificar el comportamiento que tendrá un pilote antes de la hinca. En este método el pilote es discretizado en secciones, y luego por medio de una formulación matemática se puede establecer la capacidad por punta y por fricción del pilote, y los esfuerzos en el pilote. El procedimiento anterior se hace usualmente a través de programas de computadora.

Una vez hincados, se debe establecer si los pilotes cuentan con la capacidad de carga establecida en el diseño. El método mas obvio es tomar un pilote hincado y aplicar cargas en compresión sucesivas hasta que el mismo falle. A este método se le denomina prueba de carga estática, y hasta el día de hoy, se reconoce la capacidad de carga real del pilote como la obtenida de una prueba de carga de este tipo.

Como no es práctico ni económico realizar una prueba de carga a cada pilote instalado, durante la instalación de los pilotes se requieren de métodos con los que se pueda establecer que los mismos han llegado a la capacidad teórica de una forma segura. Uno de ellos relaciona la penetración del pilote o avance por golpe del martillo con la capacidad por medio de ecuaciones empíricas denominadas fórmulas dinámicas de hinca.

Las formulas dinámicas de hinca son imprecisas, por lo que se han desarrollado otros métodos de comprobación como lo son la aplicación de pruebas dinámicas de hinca. En éstas los pilotes son instrumentados, y las señales obtenidas con analizadas en tiempo real y generalmente post-procesadas por medio de un programa de ecuación de onda para establecer la capacidad e integridad del pilote.

PALABRAS CLAVES:

Pilote, hinca, ecuación de onda, pruebas de carga.

INTRODUCCIÓN

Los pilotes son elementos de fundación con una sección transversal pequeña comparada con su longitud. Entre las aplicaciones de los pilotes están:

- a) Condiciones cuando el terreno debajo de la estructura no es capaz de soportar la carga, con seguridad o un asentamiento tolerable.
- b) En muelles y puentes cuando hay peligro que los estratos superiores del suelo puedan ser socavados por la acción de corrientes u olas.
- c) Para resistir fuerzas de tensión en estructuras sometidas a subpresión.
- d) Para resistir fuerzas horizontales como muros de sostenimiento de tierras, puentes, presas, etc.
- e) Para la estabilización de taludes y estructuras.

La hincia es el proceso de introducir pilotes preconstruidos en el terreno. Dicha hincia se puede efectuar por impacto, vibración o por medios de gatas hidráulicas.

Los pilotes hincados a través de estratos débiles hasta los mismos descansen en un estrato duro, se les denomina pilotes por punta; mientras que los pilotes transfieren la mayor parte de su carga por su fuste, o sea su superficie lateral, se les llama pilotes de fricción o flotantes. En general, los pilotes desarrollan ambas resistencias, es decir punta y fricción lateral. La capacidad de carga del pilote es la menor entre la capacidad estructural del pilote y la resistencia del medio circundante al pilote.

Existen diferentes métodos para determinar la capacidad de carga de los pilotes hincados, que se aplican dependiendo de la importancia del proyecto y los recursos disponibles. En tiempo se usan durante la etapa de diseño; o previo, durante o después de la instalación de los pilotes. En el presente artículo se dará una breve explicación de cada uno de los métodos y su rango de aplicación. En la práctica es común la aplicación varios de estos métodos para una serie de pilotes.

CÁLCULO TEÓRICO

Las fórmulas teóricas son usadas para la determinación inicial de las longitudes de hincia y de las secciones transversales de los pilotes. El cálculo depende del modelo y características geotécnicas del terreno que son obtenidas de la fase perforaciones y estudios de suelos, así como de la geometría y material del pilote. El factor de seguridad mínimo para el cálculo de capacidad estática es de 3.

En el cálculo de capacidad se considera la suma de la contribución por punta y por fricción lateral del pilote. La capacidad de carga límite por punta (Q_p) y por fricción (Q_f) de los pilotes se obtiene por medio de las siguientes fórmulas:

$$q_p = c \cdot N_c + \sigma'_p \cdot N_q^* + \sum_i \gamma'_i \cdot h_i \quad Q_p = q_p \cdot A_b \quad [1, 2]$$

$$q_{fi} = k_i \cdot \sigma'_{ni} \cdot \tan \delta_i + adh_i \quad Q_f = \sum_i q_{fi} \cdot h_i \cdot P_i \quad [3, 4]$$

Donde en todos los casos el subíndice i corresponde a cada capa de suelo con diferentes características geotécnicas, N_c , N_q^* son los factores de capacidad de carga del terreno para cimentaciones profundas, c es la cohesión promedio en la base, σ'_p es el esfuerzo vertical efectivo al nivel de la base, k_i el coeficiente de empuje lateral sobre el fuste en reposo, γ_i la densidad efectiva del terreno, h_i el espesor de cada estrato, σ'_{ni} el esfuerzo efectivo en el fuste, $\tan \delta_i$ el coeficiente de fricción entre el terreno y el pilote, adh_i es la adherencia suelo-pilote, A_b es el área transversal de la base y P_i es el perímetro promedio en cada estrato.

Algunos de las recomendaciones en la escogencia de los parámetros para el cálculo son:

- N_q^* es diferente al parámetro N_q de cimentaciones superficiales. Existen varias referencias en la literatura para la escogencia de los parámetros N_q^* y N_c .
- En suelos cohesivos no drenados se puede usar $N_c=9$, siempre y cuando la penetración del pilote en el terreno sea por lo menos $5 \cdot D$, donde D es el diámetro o dimensión transversal del pilote.
- En suelos granulares y por debajo de $20 \cdot D$, se recomienda limitar el valor del esfuerzo efectivo a un máximo en cada estrato equivalente al valor a $20 \cdot D$.
- En los terrenos cohesivos, se presenta una disminución en el factor de adherencia conforme se incrementa el parámetro de cohesión, lo cual se debe principalmente a en suelos suaves se da mejor remoldeo al pilote posterior a la hinca. Existen referencias en la literatura para la escogencia de la adherencia dependiendo de la cohesión del material.
- En el caso de pilotes abiertos, como por ejemplo los pilotes tubulares o los tipo H, a partir de cierta profundidad, el terreno forma un tapón en la punta de forma que el área de la base a usar es el área bruta de la sección (es decir de afuera a afuera del pilote) y no el área efectiva. Conservadoramente algunos autores recomiendan disminuir la capacidad por punta en un 50%.
- Cuando se hincan varios pilotes como en una pila de un puente, la capacidad de carga efectiva en el grupo se reduce respecto a la suma de las capacidades individuales de cada pilote; mientras que, los asentamientos del grupo son superiores al asentamiento calculado para un pilote. Existen diferentes relaciones en la literatura para considerar este efecto.

ECUACIÓN DE ONDA

La hinca de impacto puede ser modelada considerando la onda unidimensional del impacto del martillo en un análisis que plantea una ecuación diferencial a partir de la Segunda Ley de Newton y que es resuelta de forma discreta (Smith, 1962). Para el método, tanto el martinete de impacto como el pilote son idealizados como una serie de masas concentradas conectadas por resortes sin masa, como se muestra en la **Figura 1**.

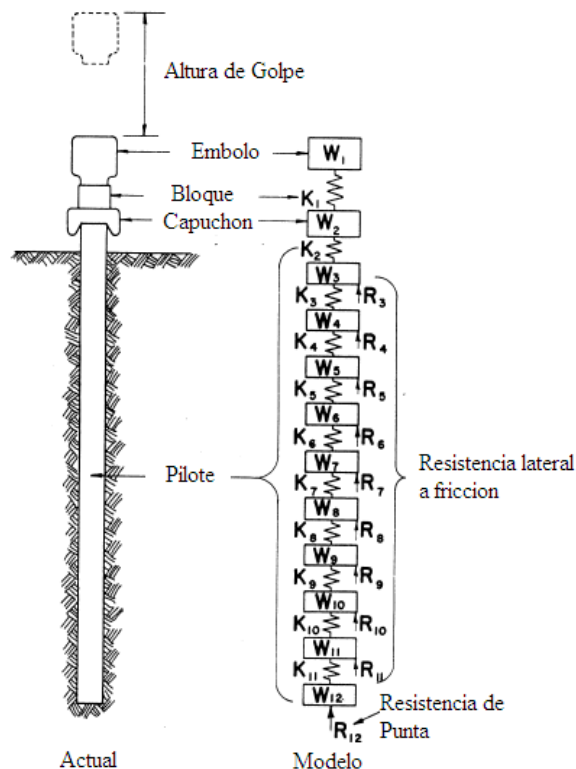


Figura 1.- Modelo de Ecuación de Onda (según Smith, 1962).

En el caso del pilote y el martinete, los resortes representan la rigidez del pilote, de los amortiguadores entre el martillo y el pilote, y en algunos casos hasta el émbolo del martillo. El suelo alrededor del pilote se considera sin peso de forma que el pilote atraviesa sin mover la masa de suelo. Para la resistencia del terreno se supone la reacción de un resorte y un elemento viscoelástico.

En el modelo anterior, el resorte se supone con un comportamiento elastoplástico, que se caracteriza porque por debajo una resistencia máxima, la deformación en el suelo responde de forma lineal-elástica. Sin embargo, si la carga llega a ser igual a un valor máximo establecido, la deformación fluye hasta que falla. El punto de esfuerzo donde se alcanza la resistencia máxima en la curva lineal-elástica se denomina “quake”. Por otra parte, el elemento viscoelástico del modelo del terreno considera una relación lineal entre la resistencia del terreno y la velocidad del elemento.

El cálculo se efectúa considerando que la onda debida al impacto del martinete pasa de un elemento a otro en un intervalo de tiempo suficientemente pequeño, alrededor de 1/4000 s, de forma que se obtenga una secuencia de fotografías instantáneas del proceso. Es decir, un intervalo es entendido como cada paso de la onda de un elemento superior al inferior. Las ecuaciones del movimiento son:

$$D_m = D_m' + v_m \cdot \Delta T \quad C_m = D_m - D_{m+1} \quad [5, 6]$$

$$F_m = C_m \cdot K_m \quad K_m = \left(\frac{AE}{L} \right)_m \quad [7, 8]$$

$$R_m = (D_m - D_{mq}) \cdot K_{ms} \cdot (1 + J \cdot v_m) \quad K_{ms} = \frac{R_{um}}{Q} \quad [9, 10]$$

$$F_{am} = F_{m-1} - F_m - R_m \quad v_m = v_m' + \frac{F_{am} \cdot g}{W_m} \cdot \Delta T \quad [11, 12]$$

Donde m es el índice de la sección de pilote o elemento analizado, y el superíndice (') significa un intervalo anterior; D_m el desplazamiento del elemento; C_m el desplazamiento relativo entre elementos; v_m la velocidad del elemento; ΔT el intervalo de tiempo; F_m la fuerza en el elemento; F_{am} la fuerza desbalanceada que produce la aceleración; J el parámetro de amortiguamiento del suelo, ya sea para fricción lateral o punta del pilote; Q el parámetro de “quake”; D_{mq} el desplazamiento plástico; K_m y K_{ms} son respectivamente las constantes de resorte para el elemento y el suelo; R_m la resistencia lateral del suelo considerando amortiguamiento, R_{um} la porción de la resistencia ultima del terreno relacionada con el elemento, W_m el peso del elemento, A , E , L son las características del pilote, respectivamente la sección transversal, módulo de elasticidad del material y la longitud, y g la constante gravitacional.

La solución es iterativa, ya que por medio de las ecuaciones anteriores se van calculando los desplazamientos, resistencias, fuerzas y velocidades de los elementos del pilote en cada uno de los intervalos. Es de entender que debido a la gran cantidad de cálculos, este procedimiento sea efectuado por medio de programas de computadora, aunque actualmente existen varios de fácil aplicación.

Ecuación de onda puede ser usada para investigar no sólo la capacidad del pilote, como curvas de capacidad contra penetración durante la hincia, sino también para verificar que el tamaño del martinete es el adecuado para la hincia, y calcular los esfuerzos de hincia para asegurarse que el pilote no está siendo sobre-esforzado, lo que incluso puede pasar en tensión. Por otra parte, como ecuación de onda establece la resistencia del pilote durante la hincia, no puede ser usado para establecer modificaciones en el tiempo de la capacidad del pilote, debido a efectos de re-moldeo ya sea tipo “set-up” que incrementa la capacidad del mismo en el tiempo o de relajación que las disminuyen.

PRUEBA DE CARGA ESTÁTICA

La prueba de carga en compresión es la prueba más común y de mayor relevancia para la determinación de la capacidad de carga de un pilote en sitio y para comprobar los supuestos de diseño para el mismo. Para diferenciarla de otras pruebas, incluyendo las del último apartado de este artículo, se le denomina como prueba de carga estática. La norma ASTM D-1143 establece el procedimiento para la aplicación de la prueba de carga estática para un pilote. Es más común la denominada prueba rápida que corresponde al apartado 5.6 de dicha norma, ya que su duración es de unas horas, frente a la alternativa que se realiza en un par de días. En cuanto a la forma de aplicación de las cargas generalmente se usan gatas hidráulicas y una estructura de reacción, frente a la adición directa de peso sobre la cabeza del pilote.

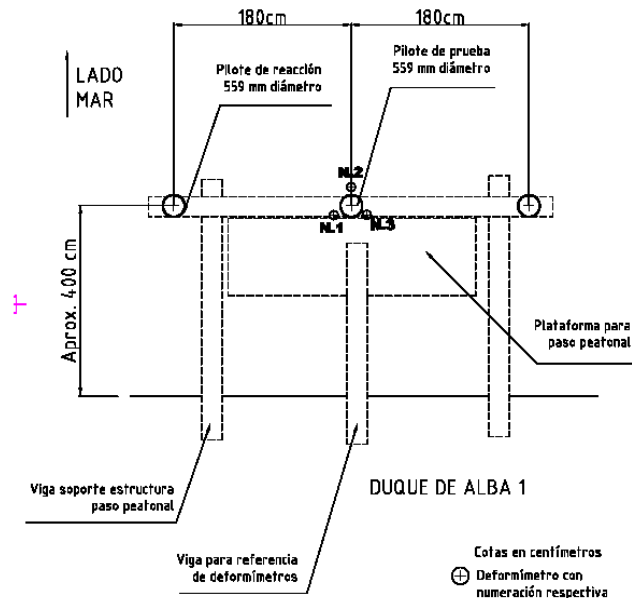


Figura 2.- Arreglo de pilotes para prueba de carga vertical.

La **Figura 2**, es un arreglo para una prueba rápida con estructura de reacción, que consta de:

- El pilote de la prueba: debe ser hincado hasta la profundidad mínima que tendrán los pilotes del proyecto, y preferiblemente con el mismo equipo de hincia a usar. Se debe llevar un registro de la hincia incluyendo la penetración, es decir la cantidad de milímetros por golpe del martillo, principalmente para la ultima sección hincada del pilote.
- Gatas hidráulicas: Una o más gatas hidráulicas con capacidad y recorrido suficiente para llevar el pilote como mínimo hasta dos veces la carga de diseño en compresión. Se debe contar con un equipo hidráulico que permita incrementar de forma controlada la presión de las gatas.
- Estructura de reacción: Está compuesta por una viga o marco de reacción y por dos pilotes o anclajes de forma que se transfiera la carga de las gatas hidráulicas a la cabeza del pilote de prueba. Esta estructura debe ser lo suficientemente rígida como para no producir deformaciones adicionales que afecten las mediciones de la prueba.
- Deformímetros: Deben estar firmemente adheridos al pilote y tener suficiente recorrido como para representar apropiadamente la deformación del mismo. Como mínimo se deben usar dos a costados opuestos del pilote y preferiblemente tres a tercios- en pilotes circulares-. La precisión recomendada es a la décima de milímetro, y en el caso de requerirse estructuras de referencia, las mismas deben ser independientes de las de reacción y de paso peatonal. El uso de equipo de topografía principalmente niveles de precisión se considera debe ser una medida adicional y no el método principal para las mediciones de deformación.

- e) Celda de carga: Para determinar la fuerza que se imprime al pilote de prueba en cada incremento o decremento de carga. En caso de no contarse con una celda de carga es posible obtener la fuerza de las curvas de calibración y la sección transversal de las gatas hidráulicas, aunque este último método tiende a ser más impreciso.
- f) Estructura de soporte para paso peatonal: Cuando el pilote es ensayado en condiciones donde no es factible pararse en el terreno directamente, como por ejemplo pilotes de estructuras marinas, se debe contar con una plataforma peatonal. La misma no debe afectar las mediciones ni estar sujeta a los otros equipos, principalmente los deformímetros.

En cuanto a la ejecución en sí de la prueba estática, el pilote previamente instalado es llevado hasta la falla en incrementos de carga o deformación programados, usualmente el primero, determinando de esta manera la carga última que puede soportar. Dichas pruebas pueden ser realizadas con incrementos monótonos o cíclicos. En este último tipo, el pilote es sometido a cargas y descargas secuenciales.

El procedimiento con variaciones de carga es así: con los equipos en posición, calibrados y tarados, se inicia agregando peso a la cabeza del pilote o dando presión a las gatas, hasta llegar al primer incremento de carga programado, se mide la deformación, se mantiene el mismo por un tiempo determinado, usualmente de unos 10 minutos, y se vuelve a medir la deformación. Generalmente hay una diferencia entre las mediciones después de aplicación de la carga con el tiempo, que debe ser un mínimo para que la deformación tienda a estabilizarse. Luego, se continúa según el programa de carga, ya sea incrementos o decrementos hasta que la prueba se completa. El resultado es una gráfica del comportamiento del pilote en deformación contra carga aplicada.

La falla del pilote teóricamente puede ser estructural del pilote o darse en el terreno, aunque un experimentador usualmente va a tratar de apartarse de la falla estructural, y se concentrará en la falla geotécnica, si es posible obtenerla. Se reconoce esta falla porque bajo la aplicación del respectivo incremento de carga de la prueba el pilote, éste penetra de forma constante sin estabilizar deformación.

Una vez realizada la prueba de carga de forma efectiva, es decir que el pilote ha fallado o quedó cerca de hacerlo, la capacidad de carga límite del pilote se determina por diferentes criterios, entre otros:

- a) Proyección Visual: De acuerdo con la tendencia de la curva de carga contra deformación se determina visualmente la carga límite. Depende de la experiencia de quien ejecuta la prueba.
- b) 0,9 Carga Límite: La carga límite es aquella para la que la razón entre la carga que se da a la mitad de la deformación y ella misma es igual a 0,9. El autor generalmente usa una aproximación cuadrática para obtener una curva de ajuste para el cálculo de esta carga límite.
- c) Pendiente Inversa: Se grafica deformación entre carga contra deformación, obteniéndose la recta de mejor ajuste. La carga límite es el inverso de la pendiente de la curva de mejor ajuste.
- d) Chellis-Fuller-Hoy: El punto de falla se presenta donde la pendiente de la curva tangente es paralela a una recta de pendiente $0,14 \text{ mm/kN} = 0,729 \text{ Ton/mm}$.
- e) Davisson: La carga límite es aquella en la que se excede la compresión elástica del pilote en el factor $(4 \text{ mm} + 1/120 d)$, donde d es el diámetro o dimensión transversal del pilote.
- f) Carga crítica: Corresponde a la intersección de dos rectas definidas con los puntos antes y después del supuesto punto de falla escogidas de acuerdo con el comportamiento de la curva de falla. Este criterio no define un valor último como tal, pero establece el punto a partir del cual se acelera la falla del pilote.

Ejemplos de la aplicación de los criterios anteriores se observan en la **Figura 3** adjunta. Finalmente, con base al resultado obtenido se calcula la capacidad admisible del pilote por medio de un factor de seguridad, usualmente de 1,5 a 2,0 que luego es generalizado para el resto de los pilotes del proyecto.

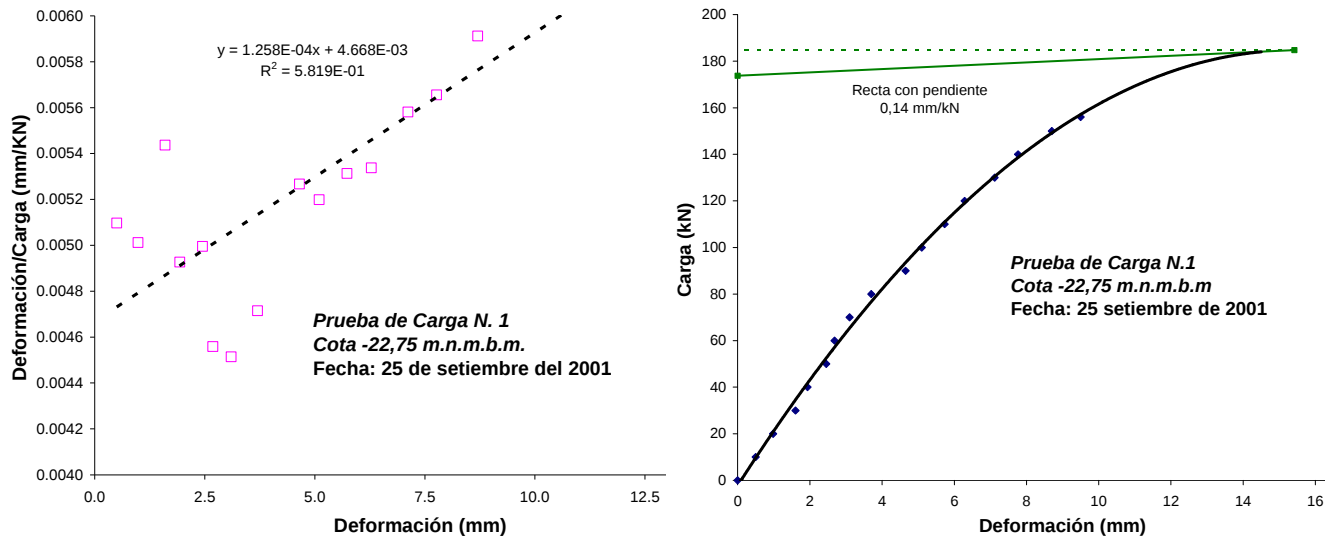


Figura 3.- Criterios capacidad para prueba estática **(Izq.)** Pendiente inversa, **(Der.)** Chellis-Fuller-Hoy.

La importancia de este tipo de prueba es que la capacidad real de un pilote se considera como aquella que es obtenida de una prueba de carga estática. Bajo esta consideración es posible usar los resultados de las pruebas de carga para calibrar los criterios y el control de calidad durante la hinca de los pilotes del proyecto, por ejemplo, la aplicación de formulas dinámicas de hinca del apartado siguiente. A pesar de las ventajas de las pruebas de carga, entre sus desventajas están que no es posible separar la capacidad de punta de la capacidad lateral del pilote, y que el arreglo y ejecución son caros por lo que generalmente no es factible la aplicación de pruebas de carga estáticas de forma indiscriminada.

FÓRMULAS DINÁMICAS DE HINCA

Durante la instalación es requerido un criterio racional para determinar cuando el pilote ha alcanzado una capacidad aceptable. En el caso de los martinetes de impacto, se acostumbra llevar un registro de golpes del martinete por longitud como un indicativo de dicha capacidad. La hinca es finalizada cuando se cumple ya sea este criterio de hinca más la penetración mínima en el terreno, o cuando se produce el rechazo práctico del martillo definido como 20 golpes por 2,5 cm, con el émbolo a máximo recorrido.

Uno de los métodos más usados en nuestro medio para estimar la capacidad de carga de un pilote con el dato de conteo de golpes del martillo, son las denominadas fórmulas dinámicas de hinca. Las fórmulas dinámicas se basan en los principios físicos de la conservación de la energía y el momento, aunque los parámetros usados en ellas son en su mayoría empíricos. Existe una gran diversidad de fórmulas dinámicas de hinca, tres de las cuales son las siguientes:

$$\text{Engineering News: } Pu = \frac{e_h \cdot E_h}{s + 0,254} \quad [13]$$

$$\text{Hiley: } Pu = \frac{e_h \cdot E_h}{s + \frac{1}{2} \cdot (k_1 + k_2 + k_3)} \cdot \frac{W_r + n^2 \cdot W_p}{W_r + W_p} \quad [14]$$

$$\text{Gates: } Pu = 126,5 \sqrt{e_h \cdot E_h \cdot \text{Log}\left(\frac{25,4}{s}\right)} \quad [15]$$

Donde, P_u es la capacidad última del pilote, e_h la eficiencia del equipo, E_h la energía del martillo, s la penetración por golpe, W_r el peso del embolo, n un coeficiente de restitución, y k_1 , k_2 , k_3 valores que dependen del material del pilote y tipo de suelo.

El consenso de los expertos es que las fórmulas dinámicas de hincas por si mismas no brindan buenas aproximaciones a la capacidad real del pilote. De hecho, el uso de las formulas dinámicas de hincas ha sido discontinuado e incluso desaprobado por los códigos y normas de varios países. Por otra parte, son de fácil aplicación y ante la falta de disponibilidad de otros métodos se ha seguido con su uso. Los factores de seguridad de las fórmulas son variables, desde 2 a 6. Se recomienda su uso sólo en proyectos pequeños, o cuando se pueden calibrar los valores obtenidos con pruebas de carga.

Alguna de las razones para las inexactitudes de las fórmulas son las simplificaciones extremas como no considerar los elementos encima del pilote como cabezotes, amortiguadores y el mismo émbolo, que el pilote a pesar de ser un elemento esbelto es considerado como un elemento rígido; y finalmente la dificultad para establecer las pérdidas de energía del martinete, ya que las mismas dependen de factores muy variables del pilote y el terreno. Ejemplo de estas simplificaciones es que en la **Ecuación [13]** que es una de las más conocidas y de mayor uso, ni siquiera considera el efecto del terreno en la capacidad.

La **Figura 4** muestra la variabilidad de las formulas dinámicas de hincas cuando se reproducen curvas de capacidad contra golpes para un martinete específico.

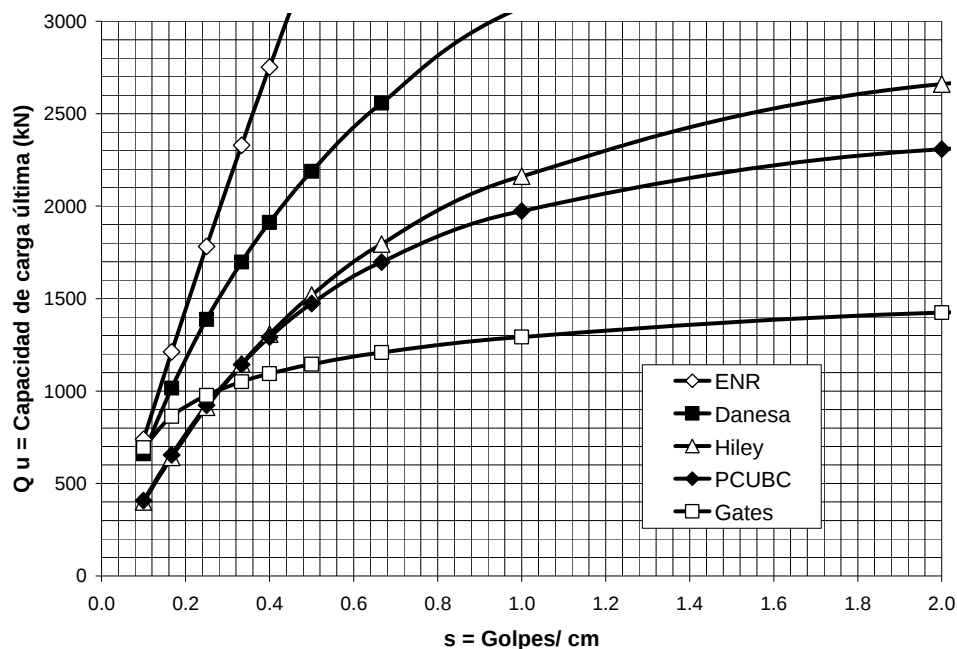


Figura 4.- Capacidad de carga de varias fórmulas dinámicas, martinete Delmag 30 para varios golpes.

PRUEBA DINÁMICA DE CARGA

Al igual que las fórmulas dinámicas, el procedimiento se aplica durante la hincas de los pilotes del proyecto. La norma ASTM 4945 establece el procedimiento para la ejecución de pruebas dinámicas de pilotes. Consiste en que el pilote a probar es instrumentado por medio de transductores de deformación y acelerómetros. Un sistema de prueba considera al menos cuatro sensores: dos de deformación y dos acelerómetros ubicados a una distancia de la cabeza de dos a tres diámetros en costados opuestos del pilote. En otros casos se instalan más transductores a diferentes alturas y costados del pilote.

Durante la hincas con cada golpe del martillo se recogen las señales que luego son analizadas en tiempo real por medio de un PDA o analizador de pilotes. Los parámetros de entrada del PDA son la sección transversal, el módulo de elasticidad, el peso específico del material y la velocidad de onda del pilote, además del factor de amortiguamiento del suelo. En la **Figura 5** se observa un PDA y sus sensores.

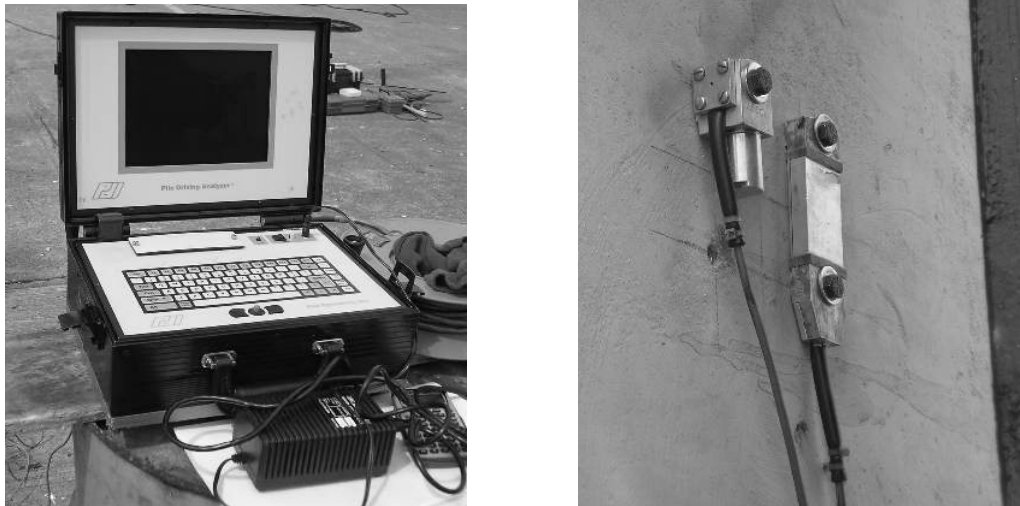


Figura 5.- (Izq.) Analizador de pilotes (PDA), **(Der.)** Transductor de deformación y acelerómetro instalados en pilote de concreto.

Por medio de integraciones y cálculos numéricos del PDA, las señales de deformación y aceleración son transformadas en registros de fuerza y velocidad contra tiempo. Estos registros pueden ser visualizados en el pantalla del PDA y sus resultados evaluados por el operador durante la prueba de hinca, quien puede a su vez concluir sobre la calidad de los datos, la distribución de la resistencia del suelo y la integridad del pilote. En este sentido, hay comportamientos típicos en la distribución de las curvas de fuerza y velocidad, que se pueden interpretar de forma específica, por ejemplo el fallo a una altura del pilote, o la penetración del pilote en materiales duros o roca.

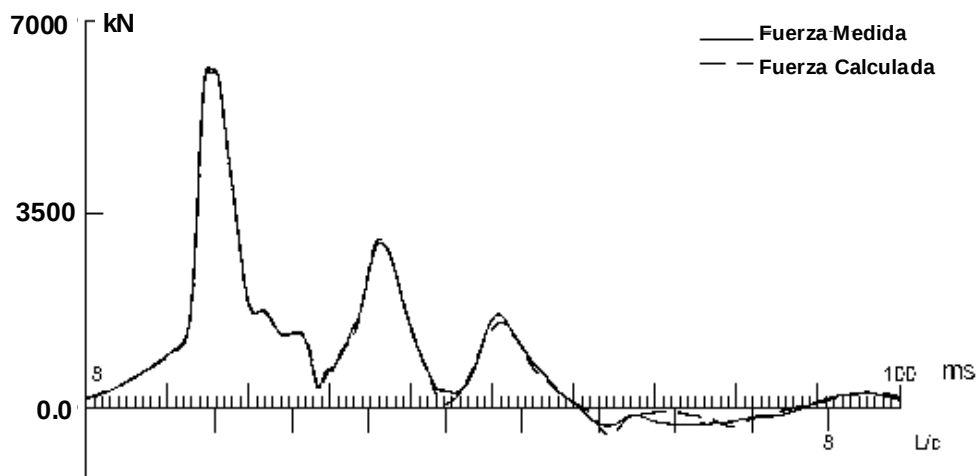


Figura 6.- Ajuste entre la fuerza medida durante la prueba, y la calculada por ecuación de onda.

La prueba de carga dinámica puede ser refinada con el uso de programas de análisis de ecuación de onda. Con estos programas se ajusta la capacidad de carga estática y la distribución de los parámetros de amortiguamiento y de resistencia del suelo. El procedimiento inicia usando los datos de fuerza y velocidad obtenidos del PDA y haciendo ciertas suposiciones razonables de los parámetros de amortiguamiento y del “quake” del suelo. El programa es corrido de forma iterativa obteniendo en cada iteración la fuerza en la cabeza del pilote, la cual es comparada con la medida durante la prueba. Luego, los parámetros del suelo y su distribución son ajustados en cada iteración hasta que se obtiene el mejor ajuste posible entre la fuerza calculada y la medida. En la **Figura 6** anterior se muestra un ejemplo de ajuste entre las curvas medidas y las calculadas después de este proceso.

Algunas de las formas en que la información de las pruebas de carga dinámica puede ser usada son:

- a) Como procedimiento alternativo a la prueba de carga estática para verificar la capacidad de carga de los pilotes de un proyecto.
- b) Establecer un criterio de hinca y/o ajustar las longitudes de los pilotes previo a la producción de dichos pilotes.
- c) Como parte del programa del control de calidad de la hinca de los pilotes para chequear la eficiencia del martinete de hinca, esfuerzos de hincado, integridad de los pilotes y resistencia.

Respecto a las pruebas de carga estática, las pruebas dinámicas son mucho más económicas pero se obtienen resultados comparables a los de ésta, en general no más del 10-15% de diferencia. Por medio del analizador PDA además es posible estimar en forma separada la capacidad por punta y en el fuste del pilote, lo cual no es posible con una prueba estática.

CONCLUSIONES

Existen varios métodos para la determinación de la capacidad de carga de los pilotes, los cuales se aplican antes, durante o después de la instalación de los mismos. Los métodos teóricos permiten establecer las dimensiones y las longitudes iniciales para los pilotes, pero por la variabilidad de factores del proceso de hinca que incluyen el suelo, el equipo de hinca y el pilote en sí, se deben aplicar otros métodos para revisar que esta capacidad puede ser alcanzada bajo las condiciones específicas de hinca.

Por medio de un modelo de ecuación de onda se puede planificar la hinca, revisando el tamaño y eficiencia del vibrador a usar y anticipando posibles problemas en campo. Pruebas de carga estática previo o posterior a la hinca, permiten re-evaluar las longitudes teóricas de hinca y verificar que la capacidad de los pilotes del proyecto es la adecuada. Durante la hinca misma de los pilotes, las fórmulas dinámicas, y preferiblemente el uso de un analizador de pilotes (PDA) se utilizan como parte del control de calidad en la instalación de los pilotes para verificar la capacidad de carga respectiva.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez, C. (2005). *Seminario de Control de Calidad de Pilotes*, Pile Dynamics Inc.

Bowles, J.E. (1996). *Foundation Analysis and Design*. Mc-Graw Hill.

Fellenius, B.H. (1975). "Test Loading of Piles and new proof testing procedure". *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 101, No. GT9, September 1975, pp. 855-869.

Prakash, S. and Sharma H.D. (1990). *Pile Foundations in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, Inc.

Smith, E.A.L. (1962). "Pile Driving Analysis by the Wave Equation". *Transactions*, ASCE, Vol. 127, Part 1, November 1962, pp. 1145-1193.

Tomlinson, M.J. (1994). *Pile Design and Construction Practice*. Viewport Publication.