

EVALUACION DE LA CAPACIDAD DE CARGA DINAMICA DE PILOTES USANDO LA ECUACION DE ONDA

Autor : Ing. Enrique F. Luján Silva
Asesor : Ph. D. Ing. Jorge E. Alva Hurtado

Maestría en Ing. Geotécnica FIC, UNI
Jefe sección de Postgrado FIC, UNI

RESUMEN

Los impactos de hincado de pilotes es un método muy económico de instalación del pilote, si esta hecho correctamente. Sin embargo, ya sea el equipo equivocado de hincado, o una elección pobre del tipo de pilote, condiciones geotécnicas del suelo pueden conducir hacia una experiencia frustrante. En la actualidad se usa mas comúnmente programas de computo de ecuación de onda, acompañada de informes de suelos, equipos de hincado de pilotes etc. Según sea la demanda del proyecto.

El presente estudio tiene como objetivo el análisis de esfuerzos inducido por el efecto del golpe del martillo al pilote en donde se utiliza la ecuación de onda, que es una idealización mas real del conjunto martillo, amortiguador, pilote, suelo, en donde intervienen parámetros dejado de lado por las formulas dinámicas existente; presentar soluciones graficas de la aplicación de este método, en el calculo de la capacidad de carga dinámica del pilote, tensiones máximas de compresión y de tracción en le material del pilote durante los golpes, energía efectivamente trasferida para el pilote, desplazamiento máximo del pilote durante el golpe. Para ello se utiliza el Programa de cómputo de análisis Dinámico de Pilotes GRLWEAP.

Este método consiste en instalar los sensores en le inicio de la hinca, y registrar los golpes mientras el pilote va penetrando en el suelo. Ese tipo de ensayo obtiene información como desempeño del sistema de hinca, riesgos de rotura, etc. La capacidad de carga de un pilote al final de la hinca generalmente es diferente de aquella tras un periodo de reposo. Para determinación de la correcta capacidad de carga de largo plazo del pilote hincado, es recomendable hacerse el ensayo en una rehinca, realizada algunos días después del termino de

la hinca. El intervalo de tiempo entre el final de la hinca y la realización del ensayo deberá ser el mayor posible, principalmente en suelos argilosos o que exhiban relajación.

La aplicación de este método es posible debido a la disponibilidad de Ensayos de Pruebas de Carga de pilotes en diversos proyectos realizados ya sea en Lima como en provincias del interior del país, proporcionados por Empresas Privadas de Instalación de Pilotes y el CISMID – FIC – UNI.

1. INTRODUCCION

Como se ha discutido en los capítulos anteriores, las formulas dinámicas, junto con las resistencias de hincado observadas, no rinden predicciones aceptablemente exactas de capacidades reales del Pilote. Para la mayoría de los ingenieros, el termino ecuación de onda se refiere a una ecuación diferencial parcial. Sin embargo, para el especialista de cimentaciones, significa una aproximación completa a la representación matemática de un sistema que consiste de martillo, amortiguadores, casquete, pilote y suelo, y un programa de computadora asociado para el cálculo conveniente de los movimientos y fuerzas en este sistema después del impacto del cabezal.

La aproximación desarrollada por E. A. L. Smith (1960), y después de que la racionalidad de la aproximación había sido reconocida, varios investigadores desarrollaron varios programas de computo. Por ejemplo, el departamento de Texas de carreteras apoyo la investigación en el instituto de transporte de Texas (TTI) en un esfuerzo por reducir el daño del pilote de concreto que usa un método del análisis realista. FHWA patrocino el desarrollo de ambos los TTI programa (el Hirsch et al. 1976) y los WEAP programan (Goble y Rausche, 1976). El supported de FHWA el desarrollo de WEAP para obtener resultados del análisis retrocedidos por medidas asumidas los pilotes de la construcción durante la instalación para una variedad de modelos del martillo. El programa de WEAP se puso al día varios tiempos bajo el patrocinio de FHWA, la ultima vez (Goble Rausche Likin s y Socios, Inc., 1996). GRLWEAP se ha aceptado para el uso en los proyectos públicos por una variedad de agencias (por ejemplo AASHTO, 1992, el Cuerpo de ejercito americano de Ingenieros, 1993),

Departamentos Estatales de transporte, y el FHWA para los análisis de la rutina. Sin embargo, esto no debe traducirse como una promoción o endoso.

La aproximación de la ecuación de onda se ha sujetado a un gran número de chequeos y estudios de la correlación.

2.- ANTECEDENTES:

- La capacidad de pilote se refiere a la transferencia de carga de las fundaciones profundas a las capas del suelo más profundas y más resistentes, o asentamientos en el límite de los suelos más suaves. La fundación trabaja bien hasta que por el efecto de alguna carga muy alta los asentamientos son excesivos o la fundación se hunde lentamente en el suelo.
- La determinación de la capacidad de un pilote es muy compleja por varias razones. Primero, el hincamiento de pilotes causa cambios permanentes y temporales en la resistencia del suelo. Por lo tanto, las pruebas de la capacidad de soporte de un pilote no ofrecen ningún resultado, al menos que haya habido algún tiempo de espera (días o semanas) después de la instalación. Segundo, mientras que las pruebas de los materiales se hacen en toda su extensión.
- Tercero, las cargas aplicadas inducen desplazamientos. Si una carga mas pesada es aplicada en un segundo ciclo, la curva carga-movimiento, seguirá aproximadamente la curva anterior, hasta que sean aplicadas cargas más pesadas y desplazamientos mayores.
- Finalmente, un pilote probado está a la falla todavía se puede utilizar si la falla se atribuye al suelo, como generalmente sucede. Realmente, cuando un pilote se desplaza por el efecto de los impactos durante el hincamiento, cada golpe del martillo constituye una “prueba a la falla”. ¿Cómo se ejecutan las pruebas de carga? En una prueba de carga sostenida, un incremento de carga axial de alrededor del 25% de la

carga de diseño es aplicada y mantenida por un tiempo prolongado hasta que el desplazamiento viene a ser menor que una tasa específica. La duración de la prueba se mide en días, por lo cual los costos son altos y la posibilidad de error en la prueba aumenta. La prueba de carga rápida más moderna se aplica a los incrementos de carga estática de 10 al 15 % de la carga de diseño y se mantienen por intervalos breves. Esta prueba a menudo se completa en menos de dos horas.

- En resumen, la aplicación de cargas estáticas y su interpretación requiere (1) una medición exacta de carga y desplazamiento, (2) una tasa de carga apropiada a las condiciones del suelo para evitar los efectos de la tasa o para incluir los efectos del escurrimiento plástico, (3) un criterio de falla apropiado, (4) suficiente tiempo de espera después de instalar los pilotes para incluir los cambios de resistencia causados por el hincamiento, y (5) un sistema de diseño e instalación de la carga de reacción para evitar su influencia en la capacidad del pilote.

3.- ENSAYO DINAMICO DE PILOTES

2.1. Ensayo Dinámico de Pilotes:

3. ENSAYO DINAMICO DE PILOTES

1.-. También conocido como prueba de carga dinámica, el Ensayo Dinámico objetiva principalmente determinar la capacidad de ruptura de la interacción entre el pilote y el suelo, para esfuerzos estáticos axiales. Él difiere de las tradicionales pruebas de carga estáticas por el hecho de que la carga es aplicada dinámicamente, a través de golpes de un sistema de percusión adecuado. La medición se hace por medio de la instalación de sensores en el fuste, en una sección situada por lo menos dos veces el diámetro del pilote

abajo de su cabeza. Las señales de los sensores son enviadas por cable al equipo PDA, donde son almacenadas y procesadas.

2.- Son usados dos pares de sensores como los mostrados al lado. El sensor de la derecha es un transductor de deformación específica, que genera una tensión proporcional a la deformación sufrida por el material del pilote durante el golpe. El sensor de la izquierda es un acelerómetro, que genera una tensión proporcional a la aceleración de las partículas del pilote.

3.1. Ensayo Dinámico en Pilotes Hincados:

1. Existen dos maneras básicas de hacer el Ensayo Dinámico en pilotes hincados:
 1. Es posible instalar los sensores en el inicio de la hinca, y registrar los golpes mientras el pilote va penetrando en el suelo. Ese tipo de ensayo visa obtener informaciones como desempeño del sistema de hinca, riesgos de rotura, etc. La capacidad de carga de un pilote al final de la hinca generalmente es diferente de aquella tras un período de reposo, debido a fenómenos como disipación de poro-presión, relajación, etc. Por lo tanto, la capacidad medida al final de la hinca no puede ser comparada directamente con el resultado de una prueba estática.
 2. Para determinación de la correcta capacidad de carga de largo plazo del pilote hincado, es recomendable hacerse el ensayo en una rehinca, realizada algunos días después del término de la hinca. El intervalo de tiempo entre el final de la hinca y la realización del ensayo deberá ser el mayor posible, principalmente en suelos argilosos o que exhiban relajación. El martillo es repuesto sobre el pilote, los sensores son instalados y enseguida se aplican algunos pocos golpes. Cuando es posible controlar la altura de caída del martillo, es usual empezarse con una altura baja, y ir aumentando gradualmente la energía aplicada, hasta que se verifique la ruptura del suelo, o cuando el PDA indicara tensiones que pongan en riesgo la integridad del material del pilote. La ruptura del suelo generalmente se caracteriza cuando la resistencia deja de aumentar (o a veces hasta disminuye) con el aumento de la altura de caída

En pilotes moldados "in situ", es recomendable hacer una preparación previa, el que consiste en la ejecución de un cabezal de hormigón para recibir los impactos. Los sensores deben ser instalados preferentemente en el fuste del pilote, y no en el cabezal.

3.2. Ensayo Dinámico – Capacidad de Carga Estática.

El Ensayo Dinámico lleva en consideración que el desplazamiento rápido del pilote en un medio viscoso como el suelo produce una resistencia estática y una dinámica. Esa última es restada de la resistencia total medida, siendo siempre informado apenas el valor de la resistencia estática.

Es necesario apenas tener cautela en el caso de pilotes con inyección bajo presión, donde grandes e imprevisibles variaciones de área de sección son posibles.

Es importante usar un martillo capaz de aplicar una energía que movilice lo máximo posible de la resistencia disponible del suelo. Es común un martillo ser capaz de hincar un pilote, pero no poseer energía suficiente para movilizar toda la resistencia, pasados algunos días del término de la hinca. En el caso de disponerse de martillo de caída libre, puede aumentarse la altura de caída, hasta cierto límite. Para pilotes moldados "in loco", se sugiere el uso de una masa con peso equivalente a de 1 % a 1,5% de la carga de ruptura que se desea medir.

El Ensayo Dinámico es de ejecución mucho más rápida que las pruebas estáticas, y tiene un costo más bajo y prácticamente independiente de la carga que se va a medir. Tiene también la ventaja de causar poco trastorno a la obra, una vez que no exige la parada de equipamientos al rededor del pilote bajo prueba. Es natural, por lo tanto, que haya interés en remplazar las pruebas estáticas por Ensayos Dinámicos. En el caso más común, si se desea apenas confirmar si los pilotes atienden a los requisitos de proyecto, el Ensayo Dinámico solo puede ser suficiente. Caso por algún motivo se desee determinar la real carga de ruptura de un pilote, será necesario efectuar una prueba de carga estática, necesariamente llevada hasta la ruptura (y no extrapolada, caso en que tendrá el mismo valor que el Ensayo Dinámico).

4. PRUEBAS INTEGRALES DE PILOTES:

El método PIT de baja deformación, utiliza la propagación de onda unidimensional. Un pequeño martillo de mano golpea la parte superior del tronco del pilote, y un acelerómetro mide el movimiento consiguiente de la parte superior del tronco.

La evaluación de la integridad de los pilotes también se puede hacer usando el método de alta deformación con el Pile Driving Analyzer (PDA). La fuerza y la velocidad del pilote se miden durante el impacto del martillo de hincar pilotes o del gran peso de caída libre. Aunque este método de prueba a menudo da mejores resultados de evaluación de integridad definida que el método PIT de baja deformación, requiere un equipo más grande y más costoso y por consiguiente cuesta mucho más hacer la prueba.

CSL (Cross Sonic Logger) requiere la instalación de tubos dentro del tronco del pilote antes de vaciar el concreto. Después de que el concreto se ha endurecido, un transmisor de pulsación y un receptor son bajados dentro de los tubos cercanos. El tiempo de llegada y la magnitud de la onda recibida, son una medida de la calidad y de la homogeneidad del concreto. Las medidas se hacen típicamente a intervalos de 1 ó 2 pulgadas.

El registrador Pile Installation Recorder para pilotes Augercast (o CFA), llamados PIR-A, ayuda a prevenir problemas antes de que sucedan. Registra la lechada de cemento o el concreto bombeado contra la profundidad, la cual, de acuerdo con el Deep Foundations Institute, es el parámetro más importante para una buena integridad de pilote vaciado con barrena.

5. GRLWEAP

GRLWEAP es un programa de puro análisis para la predicción de las tensiones del pilote y el conteo de golpes de un pilote realizado por un martillo de impacto. GRLWEAP fue diseñado para producir buenas simulaciones del comportamiento de un martillo y un pilote. Para predicciones exactas, un buen conocimiento de los dos, la resistencia estática y dinámica que difieren el comportamiento, deberían existir. Sin embargo, varios investigadores han recomendado que el modelo humedecido, originalmente propuesto por Smith, se cambie a un exponencial o a otra ley más compleja.

a. Introducción

El análisis del manejo del impacto del pilote por si mismo, llamado “índice de la técnica de la ecuación”, ha llegado a ser bien aceptada en muchos países. En general, la aproximación produce satisfactoriamente las predicciones de estrés y, combinado con los conteos del golpe de rechoques, las predicciones de capacidad productivas son bastante exactas.

Aunque, el buen progreso hacia las predicciones mejoradas han sido hechas desde el concepto original que fue propuesto por (Smith 1960), dos principales fuentes de error permanecen: El primero es el desarrollo de un martillo desconocido, y el segundo es el comportamiento dinámico desconocida del suelo. La primera fuente de error solo puede ser eliminada por dimensiones, el modelo dinámico del suelo puede además ser mejorado bien por el buen humedecimiento correlacionado y parámetros de estremecimiento o por un modelo de suelo más realista.

El programa GRLWEAP comúnmente usado está basado en el programa WEAP presentado anteriormente (Goble, Rausche 1976) y ofrece varias opciones para los cálculos de humedecimiento del suelo.

b. Términos básicos y relaciones

Las siguientes definiciones son propuestas para evitar terminología confusa.

1. Resistencia estática del suelo, R_s , es una función del desplazamiento relativo del pilote, del suelo y está aun así asumida para que estén presentes ambas partes durante la carga estática y dinámica. Mientras R_s es una función de desplazamiento y aun así varia con el tiempo, la relación R_u , por ejemplo, la resistencia última estática del suelo es una constante ($-R_u < R_s < R_u$).
2. La resistencia humedecida, R_d , es esa porción de la resistencia del suelo que no está presente durante las aplicaciones de carga estática. Dicha aplicación varia en tiempo y es comúnmente confundida para ser relacionada con la capacidad del pilote.

3. La resistencia total, R_t , es además frecuentemente llamada la resistencia dinámica. Dicha resistencia es la suma de la estática y resistencia humedecida. Seguro, sobre cargas estáticas, la resistencia humedecida es cero y la resistencia total luego es igual a la resistencia estática.

4. La capa del desliz es una zona en que la interfase de tierra del pilote donde uno comúnmente espera el movimiento relativo a ocurrir entre el muro del pilote y la masa de suelo.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 El principal objetivo del Ensayo Dinámico es obtener la capacidad de ruptura del suelo. Sin embargo, paralelamente muchos otros datos pueden ser obtenidos por el ensayo. Algunos de los más importantes son y que son determinados a través del Programa de Computo GRLWEAP son:

- 6.1.1 Tensiones máximas de compresión y de tracción en el material del pilote durante los golpes.

- 6.1.2. Nivel de flexión sufrido por el pilote durante el golpe.

- 6.1.3 Informaciones sobre la integridad del pilote, incluso la localización de eventual daño y estimativa de su intensidad.

- 6.1.3. Energía efectivamente trasferida para el pilote, permitiendo estimar la eficiencia del sistema de hinca.

- 6.1.4 Desplazamiento máximo del pilote durante el golpe.

- 6.1.5 Velocidad de aplicación de los golpes y estimativa de altura de caída para martillos Diesel simple acción.

6.2 Es importante usar un martillo capaz de aplicar una energía que movilice lo máximo posible de la resistencia disponible del suelo. Es común un martillo ser capaz de hincar un pilote, pero no poseer energía suficiente para movilizar toda la resistencia, pasados algunos días del término de la hinca. En el caso de disponerse de martillo de

caída libre, puede aumentarse la altura de caída, hasta cierto límite. Para pilotes moldados "in loco", se sugiere el uso de una masa con peso equivalente a de 1 % a 1,5% de la carga de ruptura que se desea medir.

6.3 En suelos con características poco comunes o desconocidas, es siempre aconsejable hacerse por lo menos una prueba estática de verificación, para comprobar si la metodología adoptada para los Ensayos Dinámicos está correcta. Es el caso por ejemplo de suelos que presentan relajación, donde el Ensayo Dinámico debe hacerse preferentemente bastante tiempo después de la hinca de los pilotes, y la capacidad determinada a través de un primer golpe de alta energía

REFERENCIAS:

“Soil resistance Predictions From Pile Dynamics” – Rausche, F., Goble, G. and Moses F., Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 98, N° SM9, Sep. 1972, pp. 917-937.

« Dynamic Détermination of Pile Capacity » - Rausche, F., Goble, G. and Likins, G., ASCE 1985.

« On the Apllication of PDA Dynamic Pile Testing » - Goble, G. and Likins, G.- STRESSWAVE’96 Conférence, Orlando, FL, 1996.

« Pile Damage Assessments Using the Pile Driving Analyzer » - Webter, S. and Teferra, STRESSWAVE’96 Conférence, Orlando, FL, 1996.

« Investigation of Dynamic Soil Resistance on Piles Using GRLWEAP » - Rausche, F., Goble, G., Proceeding of the Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, The Netherlands, September 1992.

« Wave Equation Correlation Studies » - Thendean, G., Rausche, F., Svinkin, M., and Likins, G., STRESSWAVE ’96 Conference, Orlando, FL, 1996.

« Deep Foundation Capacity – What Is It ? – Goble, G., Hussein, M., Geotechnical Special Publication N° 94, Amherst, Massachusetts, April 9-12, 2000.

ANEXOS





