

PRUEBAS DINÁMICAS DE CARGA EN PILOTES “HECHAS EN COSTA RICA”

Mauricio Coto¹, Luis Ángel Vargas¹, Luis Millan²

(1) M y V Soluciones Geotécnicas, (2) Millan Ingeniería, Costa Rica
MCOTO@MYV-SG.COM, LVARGAS@MYV-SG.COM, LUIS@MILLANING.COM

Introducción

En el 2013, los autores, adquirieron un equipo para efectuar análisis dinámico de pilotes (PDA acrónimo en inglés de “Pile Dynamic Analysis”), y se capacitaron en Holanda y en Estados Unidos en su uso. A la fecha han ejecutado pruebas PDA en proyectos de diferente índole y complejidad. Con el tiempo, han recopilado experiencias valiosas para el desarrollo de esta tecnología en el país.

Los proyectos realizados incluyen pilotes prefabricados de concreto para un edificio en condominio en San Rafael de Alajuela, pilotes tubulares de acero en varias obras portuarias (Caldera, Moín, Punta Morales, Paquera, Playa Naranjo), y pilotes pre-excavados de concreto de gran diámetro en una planta hidroeléctrica en Atenas. Fuera del país, se han efectuado pruebas en Guatemala, México, Bahamas y Colombia.

A la fecha se han hecho cerca de 100 pruebas dinámicas, en pilotes con capacidades desde 1 hasta 10 MN. En algunos proyectos, también se han ejecutado pruebas estáticas. En estos casos, las estimaciones de capacidad obtenidas de las pruebas dinámicas, han sido totalmente comparables con los de las pruebas estáticas.

Objetivo

El propósito de este artículo es describir el desarrollo de las pruebas dinámicas en Costa Rica, con una discusión de los resultados obtenidos en casos de estudio, en proyectos locales específicos, incluyendo tanto pruebas realizadas en pilotes hincados como pre-excavados.

Identificación del problema

En proyectos de pilotes hincados se requiere de un método racional para determinar cuándo los mismos han alcanzado la capacidad requerida. Tradicionalmente, se realiza un registro de golpes del martinete de impacto, contra penetración en el terreno, también denominado registro de hinca.

Para transformar este registro a capacidades, uno de los métodos más usados son las formulas dinámicas de hinca. Estas se basan en los principios físicos de la conservación de la energía y el momento, considerando el embolo del martinete y el pilote como objetos rígidos que colisionan.

El consenso de los expertos es que las fórmulas dinámicas de hinca por si mismas no brindan buenas aproximaciones a la capacidad real del pilote. Aparte del modelo poco realista con elementos rígidos, hacen suposiciones gruesas de parámetros, que son en su mayoría empíricos. E igual de importante, con las mismas se presenta un desconocimiento de la pérdida de energía en el sistema del martinete de impacto.

De hecho, las formulas dinámicas se han discontinuado e incluso desaprobado por códigos y normas de varios países.

No obstante, el hecho de que son de fácil aplicación y ante la falta de otros métodos disponibles, se ha continuado con su uso.

En cuanto a pilotes pre-excavados, el problema de estimar en su capacidad es aún más complejo. Estos se dimensionan por fórmulas estáticas, basados en perforaciones de suelos, y parámetros geotécnicos de dichos estudios. Simplemente se especifica una profundidad para el pilote con base en esta información.

Luego, se usan métodos de control de calidad, principalmente, para determinar posibles daños o ausencia de ellos en los pilotes. Algunas son las pruebas de integridad (PIT) o pruebas sísmicas (CSL). Sin embargo, estas dicen poco de la capacidad de carga del pilote.

Para comprobar dicha capacidad, tanto para pilotes hincados como pre-excavados, se han usado pruebas de carga estática en compresión. Sin embargo, las mismas requieren de estructuras de reacción importantes, por lo que su costo tiende a ser significativo.

En principio solo se pueden justificar económicamente en proyectos de gran envergadura, y aun en estos casos, la variabilidad de las condiciones geotécnicas puede ser tal que la representatividad de unas cuantas pruebas puede que no sea suficiente para entender el contexto de todo un proyecto de pilotes.

Además, determinar condiciones en las que en un mismo pilote se dan cambios de capacidad con el tiempo pueden ser complicadas de manejar con enfoques tradicionales.

En muchos proyectos, la comprobación de la capacidad de carga nunca se hace. Como consecuencia, tienden a tener altos factores de seguridad, sobre todo por lo catastrófico que puede resultar una falla de una fundación.

En este marco, las pruebas dinámicas de carga, son un método sofisticado, pero de sencilla aplicación, que permiten resolver la gran mayoría de los problemas indicados, incluyendo la determinación de la capacidad de carga de un pilote.

Metodología de PDA - DLT

Las pruebas dinámicas se basan en el método de ecuación de onda. En esta, la hinca de un pilote por medio de un martinete de impacto, puede ser modelada discretizando el pilote y la resistencia del terreno en secciones. Luego se considera la onda unidimensional de un impacto, en un análisis que plantea una ecuación diferencial a partir de la Segunda Ley de Newton, la cual se resuelve de forma discreta. (Ver Figura 1)

El cálculo se efectúa tomando la onda debida al impacto del martinete, que pasa de un elemento a otro en un intervalo de tiempo muy pequeño, de forma que se obtenga una secuencia de fotografías instantáneas del proceso. La solución es iterativa, calculando desplazamientos, resistencias, fuerzas y velocidades de los elementos en cada intervalo.

En una prueba dinámica, un pilote es instrumentado, y las mediciones se utilizan en un modelo de ecuación de onda, lo que permite conocer mejor el comportamiento de dicho pilote en hínca. Puede aplicarse tanto en pilotes hincados como en pilotes pre-excavados. En estos últimos, se requieren aplicar golpes externos por medio de un martinete o simplemente por un peso que se deja caer en la cabeza del pilote.

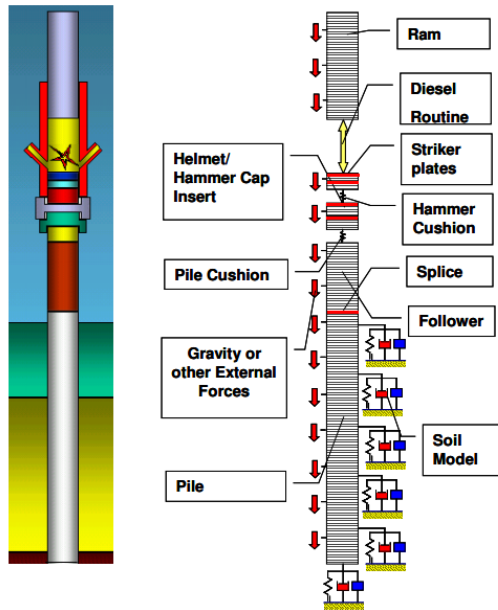


Figura 1.- Esquema de modelo de ecuación de onda según TNO.

La experiencia internacional en pruebas dinámicas de carga, es amplia, con innumerables casos de estudio, y aplicaciones probadas de la efectividad del método. Tanto es así, que el procedimiento para la ejecución de este tipo de pruebas, está establecido por la norma ASTM 4945.

El equipo de PDA se compone de dos acelerómetros y dos transductores de desplazamiento que son instalados en la cabeza del pilote, así como una unidad de control inalámbrica ("Pile Dynamic Register" o PDR) que envía las señales de registro a una computadora central.



Figura 2.- Unidad inalámbrica (PDR) del equipo PDA.

En la *Figura 2* se observa el computador principal del equipo, mientras que en la *Figura 3*, la colocación del equipo en un pilote de prueba, junto con los sensores de deformación y aceleración indicados.

Durante la prueba del pilote, con el golpe del martinete de hínca o de una maza, se recogen las señales de deformación y

aceleración. Por medio de integraciones y cálculos numéricos, dichas señales son transformadas, en registros de fuerza y velocidad contra tiempo, relacionados con comportamientos y reacciones del suelo a distintas alturas del pilote. El operador puede visualizar estos registros en la pantalla del computador.

Durante la prueba los registros se pueden evaluar, y concluir sobre la calidad de los datos, los esfuerzos e integridad del pilote, y cualitativamente sobre la distribución de la resistencia del terreno, específicamente fricción y punta.

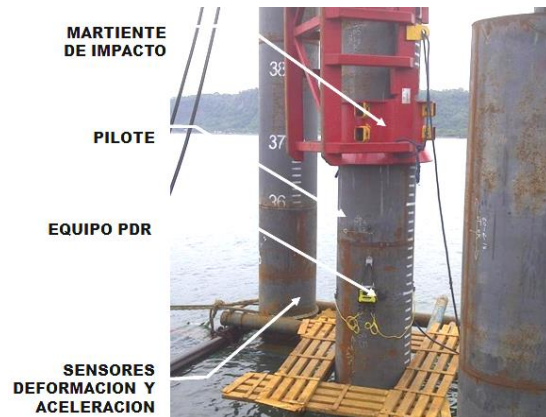


Figura 3.- Partes de una prueba dinámica, ejemplo pilote marino.

Por otra parte, los resultados en campo, pueden ser afinados, con el uso de programas de análisis de ecuación de onda especializados para la aplicación, en un proceso denominado ajuste de señales o emparejamiento de señales (en inglés "signal matching"), como se muestra en la *Figura 4*.

Se procede haciendo correr el programa de análisis de ecuación de onda, de forma iterativa, ajustando los parámetros del suelo del modelo. Esto se repite hasta que se obtiene un ajuste aceptable entre fuerza calculada y medida en campo. Uno de los resultados es la capacidad del pilote, incluyendo una distribución de fricción en fuste y en la punta del pilote.

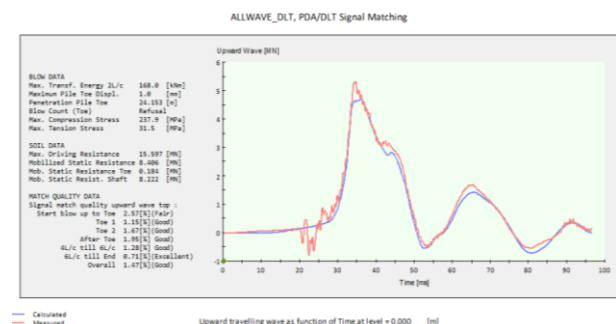


Figura 4.- Resultado del proceso de ajuste de señales (MATCHING).

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

- Como procedimiento alternativo a la prueba de carga estática para verificar la capacidad de los pilotes.
- Establecer un criterio de hínca y/o ajustar las longitudes de los pilotes previo a la producción de dichos pilotes.
- En el control de calidad de la hínca de los pilotes, chequear la eficiencia del martinete de hínca, esfuerzos de hincado, integridad de los pilotes y resistencia.

- d. En rehinca para verificar el crecimiento de la capacidad en función del tiempo producto del fenómeno de consolidación radial (especialmente importante en arcillas).

Para diferenciar, al proceso de verificación en campo se le denomina PDA (“Pile Dynamic Analysis”), mientras que la verificación de capacidad se indica usualmente como DLT (“Dynamic Load Test”). Ambos se realizan con el mismo equipo.

Una prueba de carga dinámica es mucho menos costosa y requiere de menor tiempo de ejecución que una prueba de estática. Además, las pruebas dinámicas se pueden ejecutar en pilotes inclinados, lo cual no es usual en pruebas estáticas por razones de seguridad. Aun así, los resultados son comprobables a una prueba estática, en general con diferencias del 10-15%.

Caso 1: Muelle Granelero de Caldera

El muelle se construyó entre el 2013 al 2014, e incluía la instalación de 365 pilotes tubulares de acero de 914 mm de diámetro y 16-19 mm de espesor, con longitudes desde 30 a 50 metros, para soporte de un puente de acceso, una plataforma de atraque y un duque de alba de amarre. Con excepción del duque de alba, los pilotes eran verticales. En la *Figura 5* se muestra una fotografía de la construcción.

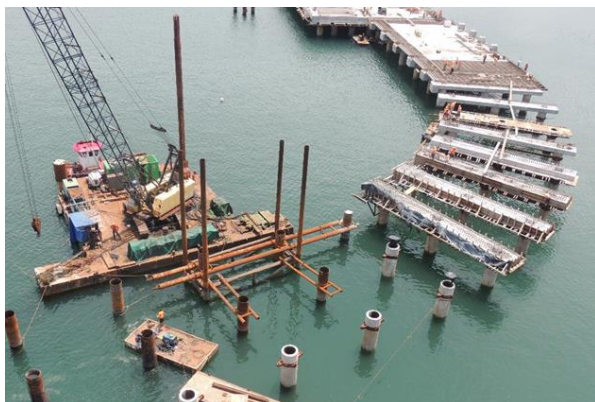


Figura 5.- Vista del Muelle Granelero de Caldera en construcción.

Para efectos geotécnicos se identificaron Tres Zonas, siendo la Zona 3, la más alejada de la costa. En esta había posibilidades de que no hubiera una punta franca, esperándose que los pilotes se comportaran básicamente en fricción. En la Zona 2 los pilotes se hincaron con rechazo a la roca, mientras que en la Zona 1, era necesario perforar antes en la roca.

Para la instalación de los pilotes se usó un martinete vibratorio para hincar a través de las capas más suaves, y luego se completó con un martinete de impacto diésel de acción simple Delmag 62-22, con un peso de pistón de 61 kN, peso total de 216 kN, energía entregada según fabricante de 107-224 KN.m.

Se efectuaron 35 pruebas dinámicas de carga, como parte del control de calidad de la hinka de los pilotes del proyecto. Las pruebas se hicieron básicamente en re-hinca, es decir, con un tiempo de espera entre la hinka y la prueba. Esto permite tomar en cuenta posibles efectos de cambios en la capacidad en el tiempo (principalmente ganancia de capacidad).

En la *Tabla 1* se observan los resultados resumidos de estas pruebas para las zonas del muelle estudiadas. En ellas se logró comprobar que el esfuerzo en los pilotes es menor que el esfuerzo admisible, además de corroborar paralelamente la

capacidad de los pilotes del proyecto, las cuales sobrepasaron los valores originales de diseño.

Tabla 1. Resultados resumen de las pruebas dinámicas, Caldera.

Zona	Valor	Capacidad última (kN)			Factor Seguridad
		Fricción	Punta	Total	
Muelle Zona 3	Promedio	6,172	881	7,053	4,03
	Mínimo	4,424	516	5,327	3,04
	Máximo	7,846	1,128	8,947	5,11
Muelle Zonas 1 y 2	Promedio	6,023	974	7,834	3,13
	Mínimo	5,157	726	5,883	2,35
	Máximo	9,075	1,181	10,152	4,06
Puente Zona 1	Promedio	6,859	1,071	7,930	3,17
	Mínimo	4,579	568	5,504	2,20
	Máximo	9,700	1,564	10,834	4,33

Los pilotes no se esforzaban más allá de su esfuerzo admisible, además de corroborar la capacidad de los pilotes del proyecto, sobrepasando la misma.

También, como parte del control de calidad de la capacidad de los pilotes, se efectuaron tres pruebas estáticas, a pilotes fuera de posiciones definitivas, una hasta 3.500 kN, y dos hasta las 5.000 kN. Esto por cuanto se usó un factor de seguridad de (2), donde para la Zona 3 la capacidad admisible es de 1.500 a 1.750 kN, mientras que para las Zonas 1 y 2 de 2.500 kN. Cabe indicar que en ninguna de las tres pruebas realizadas se logró provocar la falla geotécnica de los pilotes.

El haber efectuado pruebas dinámicas y estáticas permitió, comparar los resultados. Por ejemplo, las curvas de carga-asentamiento de los ciclos de dichas pruebas, presentan pendientes (rigideces) similares a la curva simulada de la prueba dinámica respectiva, tal y como se ve en la *Figura 6*.

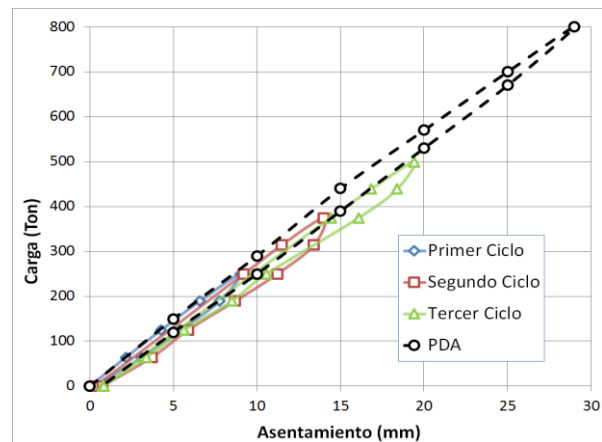


Figura 6.- Curvas Carga-deformación de pruebas estática y dinámica

Las pruebas estáticas no pudieron continuarse más allá de los 5.000 kN por ser el límite del sistema hidráulico de aplicación de carga usado, y estructural del sistema de reacción. En este sentido, las pruebas dinámicas fueron de suma importancia porque demostraron la existencia de una remanente de capacidad de carga en los pilotes, no notado con las pruebas estáticas.

Cabe indicar que este fue el primer proyecto en el país, en el que se hicieron pruebas dinámicas de carga en pilotes. Los resultados obtenidos mostraron la concordancia con pruebas estáticas, y la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Caso 2: Muelle Petrolero de Moín

El Nuevo Muelle Petrolero de RECOPE se ubica al Norte del Puesto Petrolero actual en Moín. Las estructuras sobre pilotes incluyen un puente de acceso, plataformas de carga y depósito, y duques de alba para amarre y atraque. Son 109 pilotes tubulares de acero de 914 mm de diámetro y 16 mm de espesor, con longitudes de 33 a 42 m. La hinca se inició a finales del 2014, y se completó a inicios del año. Actualmente se está completando la construcción del muelle (*Figura 7*).

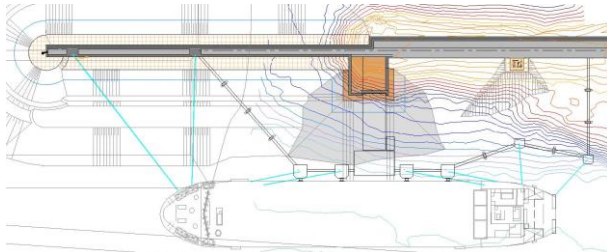


Figura 7.- Planta del Nuevo Muelle Petrolero de Moín.

Con base en las fuerzas requeridas del análisis estructural de los pilotes de las estructuras, según combinaciones de carga, y profundidades de diseño, se hicieron para efectos de revisión tres agrupaciones, que se resumen en la *Tabla 2*.

Tabla 2.- Agrupación estructuras del Muelle Petrolero de Moín.

Agrupación Estructuras	Fuerzas en compresión máximas (Ton)			Cotas de hinca (m NMBS)
	Servicio	Fuerza	Extremo	
Plataforma de Carga, Plataforma Depósito, Puente, Duques DA5 y DA6	117,5	181,2	240,4	-23,1 a -29,9
Duques de Atraque DA1-DA4	226,8	384,7	438,3	-38,3 a -41,3
Apoyos de Pasarelas	22,3	32,0	24,7	-11,2 a -30,0

El programa de control, incluyó corridas de Ecuación de Onda previas a la hinca, pruebas estáticas de carga, y pruebas dinámicas. Las pruebas dinámicas se usaron en la definición y comprobación de los criterios de hinca, y no solamente en el control de calidad de la instalación, como se hizo en Caldera.

Las corridas de ecuación de onda permitieron definir criterios de hinca previos antes de las pruebas de carga. La predicción fue buena. Por ejemplo, para el martinete Birminghammer 6505-B usado, se estimó 28 golpes/10 cm con 160 cm de caída del embolo, para los pilotes de la Agrupación, 1 y el criterio de hinca adoptado después de las pruebas de carga tanto estáticas como dinámicas realizadas, fue de 25 golpes/10 cm.

En este proyecto, se realizaron doce pruebas dinámicas de pilotes, incluyendo los pilotes de las pruebas de carga estática y el resto a pilotes de producción para verificar su capacidad de carga. Se hizo ajuste de señales, para obtener resultados afinados de capacidad.

Como ejemplo, en la *Figura 8*, se muestra las señales de fuerza y velocidad, del pilote numerado 58, que fue uno de los duques de alba de atraque (Agrupación 2), efectuada.

Además, en la *Tabla 3* se muestran los resultados para la Agrupación 1 de estructuras. Uno de los aspectos notados es que como se hicieron pruebas tanto en hinca como en rehinca fue posible observar un fenómeno de ganancia de resistencia en el tiempo (“Set-up”), lo cual es común en sitios donde existe sobre todo terrenos con capas arcillosas.

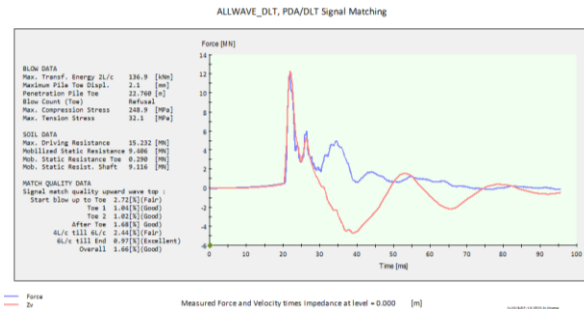


Figura 8.- Curvas de fuerza velocidad de uno de las pruebas PDA.

Por otra parte, se ejecutaron tres pruebas de carga estática con cargas de aprobación de 3 MN en una (para la Agrupación 1), y de 7 MN en las otras dos (Agrupación 2).

Se cumplieron dos ciclos de carga sin falla de los pilotes de prueba, y en un tercer ciclo se procuró llegar a la carga de falla, de los pilotes, pero sólo sucedió en la primera prueba.

Los resultados obtenidos de las pruebas dinámicas, tienen buena concordancia con las pruebas estáticas. Así, el pilote de la Prueba Estática N.1 dio una carga última de 3,7 MN, cercana a la de la prueba dinámica de 3,3 MN, esa última con un menor tiempo de espera.

Tabla 3.- Resultados de pruebas dinámicas para Agrupación N.1.

Pilote Prueba	Días de Espera	Carga Última (kN)	Carga Requerida (kN)	Tipo prueba
Prueba Carga 1	0	286,7	329,5	Hinca
	1	349,0	329,5	Rehinca
12	0	259,3	181,4	Hinca
16	0	265,6	273,8	Hinca
	6	368,3	273,8	Rehinca
19	10	350,8	273,8	Rehinca
69	0	395,0	329,5	Hinca

Observación importante: Con un día de espera, el incremento de capacidad en rehinca fue del 22%. Con seis días de espera, fue de 38%. Esto es clave en el entendimiento de la respuesta mecánica de un pilote y la respuesta más directa la da el ensayo PDA – DLT.

Las Pruebas Estáticas N.2 y N.3 evidenciaron capacidades elevadas, concordante con las pruebas dinámicas. Así, las pruebas dinámicas denotaban capacidades de hasta 9 MN, limitadas porque no se movilizó toda la capacidad disponible en los pilotes. Por otra parte, en la prueba de carga estática N.3, el pilote se llevó hasta los 11 MN, sin falla aparente.

Caso 3: Puente PH Chucás

Como parte del Proyecto Hidroeléctrico Chucás, se construyó un puente de 255 metros de longitud, sobre el río Tárcoles conformado por dos bastiones y cuatro pilas.

Tres de las pilas y un bastión del puente están cimentadas sobre pilotes pre-excavados de concreto de 120 cm de diámetro y colados con tubería tipo “tremie”.

Se hizo una prueba dinámica en un pilote de cada una de las tres pilas piloteadas. Para la ejecución de dichos ensayos, la empresa CODOCSA fabricó una maza ajustable de 15,8 Ton para esta prueba específica y una guía, las cuales se muestran en la *Figura 9*.

Además, se requirió de una grúa con un aditamento para la movilización de la maza y la guía, así como la caída libre de la maza sobre el pilote.



Figura 9.- Maza y guía para la ejecución de las pruebas dinámicas.

Previo a las pruebas dinámicas se realizó un análisis de integridad por medio de pruebas CSL (Cross-Hole Sonic Logging Test) en el pilote específico a ensayar.

En la *Figura 10* se muestra uno de las salidas de un par de tubos analizados. Para el caso de estudio el pilote presentó anomalías únicamente en la zona superior en el primer metro, zona que fue demolida para hacer la conexión con la placa del bastión.

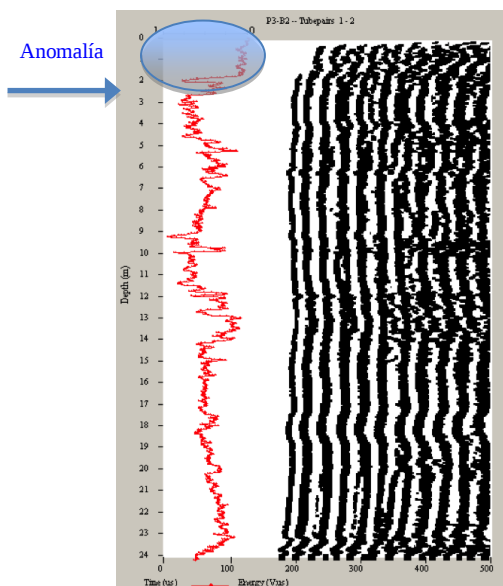


Figura 10.- Diagrama cascada para determinar integridad de pilotes por medio de CSL (Crosshole Sonic Logging)

Para la ejecución de las pruebas se hizo un análisis previo de ecuación de onda, para predicción del comportamiento del sistema pilote-maza. Mediante este análisis, se determinó la energía transferida por el impacto, esfuerzos inducidos en el pilote y capacidad soportante teórica. El resultado del análisis se presenta en la *Tabla 4*.

En la prueba, la maza se dejó caer desde diferentes alturas, según fue determinado en el análisis anterior, y simultáneamente se controlaron los esfuerzos de tensión en el pilote.

Por otra parte, por aspectos constructivos, los pilotes pre-excavados no suelen contar con secciones homogéneas. Se

decidió realizar una prueba de integridad (PIT-“Pile Integrity Test”), para determinar la profundidad de las protuberancias en el pilote, con el objeto de estimar su geometría de manera más precisa, y realizar el ajuste de señales con mejor calidad.

Tabla 4.- Análisis de energía previo a la prueba.

Altura caída (m)	Energía Potencial (kN-m)	Energía Impacto (kN-m)	Energía transferida (kN-m)	Esfuerzos compresión (MPa)	Esfuerzos tensión (MPa)
0,3	45,0	45,0	16,7	7,8	2,9
0,5	79,4	79,4	27,7	9,9	3,6
0,8	126,8	126,8	44,3	12,3	4,5
1,0	158,5	158,5	56,3	13,8	5,1
1,5	237,7	237,7	82,8	16,6	6,3

En la *Figura 11* se muestra el resultado de esta prueba y de la ubicación de dichas protuberancias. Complementándose con la gráfica de consumo de concreto versus profundidad que el contratista generaba, se llegó a la siguiente estimación de la sección transversal, la cual se muestra en la *Figura 12*.

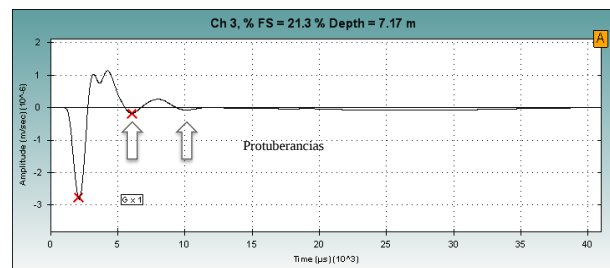


Figura 11.- Resultado prueba PIT para determinar protuberancias.

Esta estimación geométrica es clave para una correcta interpretación de la prueba en pilotes preexcavados (diámetro variable en función de la profundidad). Esta incertidumbre no existe en el caso de pilotes hincados ya que son prefabricados, y su geometría es controlada previamente.

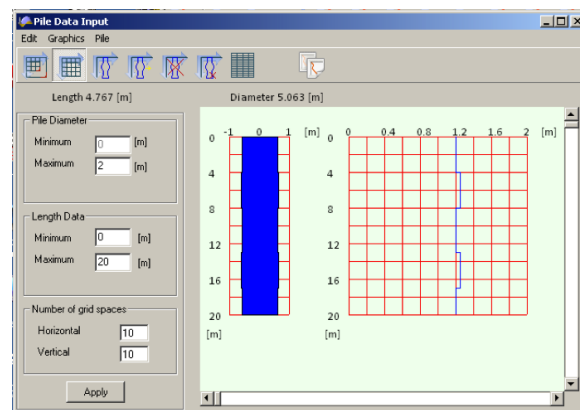


Figura 12.- Estimación de la sección transversal del pilote.

De esta manera realizando el proceso de emparejamiento (Signal Matching) de señales con el golpe que le transfirió mayor energía al pilote, se alcanzaron resultados indicados en la *Tabla 5*.

Tabla 5.- Resultados de la prueba.

Energías (kN-m)	Capacidades (kN)			Esfuerzos de tensión (MPa)
	Potencial	En cabeza	En punta	
174	136	38,5	9.470	440
			9.030	3,0

Caso 4: Cimentación pilotes Condominio 9-10.

Actualmente la empresa CONCASA se encuentra construyendo el condominio 9-10, como parte del Proyecto Campo Real, localizado en San Rafael de Alajuela.

El condominio consta de 12 edificios de 9 pisos y están fundados sobre losas de cimentación con asentamientos controlados por medio de pilotes hincados.

Los pilotes presentan diferente configuración dependiendo del edificio, sin embargo, existen pilotes de 5, 7 y 12 metros de longitud en dos secciones diferentes octagonales y cuadradas.

En este sitio se llevaron a cabo pruebas DLT en re-hinca para determinar la capacidad de pilotes clave. Dichas pruebas se llevaron a cabo semana y media después de su hinca inicial.

Según los cálculos del diseño la losa de cimentación le transfiere a cada pilote en su condición más crítica una carga última de 1 MN a los pilotes cuadrados y de 0,5 MN a los pilotes octagonales.

Por lo anterior, el objetivo primordial de estas pruebas DLT fue determinar si los pilotes eran capaces de transmitir estas fuerzas al terreno.

Los resultados indicaron que los pilotes si estaban en capacidad de soportar las solicitaciones de la estructura tal y como se observa en la *Tabla 6*.

Esta es una manera bastante rápida y económica de determinar la capacidad de soporte que presentan estos tipos de elementos de cimentación.

Tabla 6.- Resultados de la prueba.

Pilote	Capacidad estática movilizada total (kN)	Capacidad estática movilizada por punta (kN)	Capacidad estática movilizada fricción (kN)	Esfuerzos compresión en el pilote (MPa)
Cuadrado Edificio D	1.420	564	857	8,5
Cuadrado Edificio D	1.230	800	439	9,2
Octogonal Edificio H	708	530	178	1,4

Nota importante: Los datos de capacidad de los pilotes estimados mediante DLT (Dynamic Load Testing) superaron a los valores requeridos de diseño, lo cual le dio la tranquilidad al Ingeniero Estructural de continuar con la construcción de la solución.

Conclusiones.

Debido a la variabilidad geológica, especialmente considerable en Costa Rica, es conveniente que se implemente una metodología que permita confirmar premisas de diseño (capacidad, etc.) en un proyecto de pilotes. Los pilotes son muy susceptibles a variaciones geológicas tanto en planta como en profundidad, por lo que el seguimiento constructivo es clave para lograr condiciones balanceadas de costo y seguridad.

Típicamente se recurre a pruebas estáticas de carga por medio de una reacción, sin embargo, el costo y tiempo que implican estas pruebas usualmente las vuelve prohibitivas para proyectos de mediana a baja envergadura. Aún así, para proyectos de gran envergadura, la cantidad de pruebas estáticas es restringida y carece de representatividad estadística, lo que da lugar a vacíos de información que

afectan la toma de decisiones.

Ante este contexto, las pruebas dinámicas de pilotes constituyen una alternativa muy promisoría para control y seguimiento de proyectos de pilotes. Las pruebas DLT (Dynamic Load Testing) permiten estimar la capacidad de un pilote, usualmente con errores bajos (10% - 15%) y las pruebas PDA (Pile Dynamic Analysis) permiten dar un seguimiento constructivo en el caso de pilotes hincados.

Las pruebas dinámicas originalmente fueron pensadas para pilotes hincados, como una alternativa al uso indiscriminado de fórmulas de hinca dinámicas. No obstante, se han hecho ensayos exitosos en pilotes preexcavados, tal como se demostró en PH Chucas. Las dos diferencias fundamentales entre pilotes hincados y pilotes preexcavados es que para los primeros, el mismo proceso constructivo (hinca con martinete) permite hacer la prueba mientras que en los segundos, es necesario implementar un sistema paralelo (masa de caída) para generar el impulso dinámico.

La segunda diferencia es que la geometría del pilote hincado es controlada en un proceso industrial, mientras que la forma geométrica final del pilote preexcavado depende mucho del depósito de suelo y es irregular. Se demostró que por medio de técnicas como PIT, es factible esquematizar la geometría del pilote de interés, e incorporarla en los cálculos.

La rapidez de las pruebas DLT hace que sea más fácil hacer una gran cantidad en un relativo corto período de tiempo, lo cual permite mayor representatividad estadística de las condiciones geotécnicas en un sitio de proyecto específico. Adicionalmente, la ausencia de una reacción (como la requerida en pruebas estáticas) hace que sean mucho más económicas en una relación 1 : 10 prácticamente.

Un factor adicional es que las pruebas DLT permiten entender variaciones de capacidad del pilote en el tiempo después de un proceso de hinca. Esto es especialmente crítico en depósitos arcillosos saturados ya que la disipación radial de presión de exceso de presión de poros producto de la hinca, incrementa considerablemente la capacidad. En el ejemplo de Moín se vio como con un día de reposo y rehinca, la capacidad se incrementó 22% y con 6 días de reposo, la capacidad se incrementó un 38%.

Por lo anterior y dadas las experiencias exitosas obtenidas tanto en Costa Rica como fuera del país, los autores consideran que esta metodología de revisión de pilotes en etapa constructiva es muy eficaz y promisoría para proyectos de cualquier magnitud, en un futuro muy cercano.

Referencias Bibliográficas

- Coto, M. y Vargas, L.A.** (2015) *Informes de Pruebas de Carga Dinámica a pilotes Proyecto Puente P.H. Chucús*. Atenas, Costa Rica
- Coto, M. y Vargas, L.A.** (2015-2016) *Informes de Pruebas de Carga Dinámica a pilotes Proyecto Condominio 9-10*, Costa Rica.
- Middendorp, P and van Delft, M.C.H.** (2013). *Stress Wave Theory*. Allnamics, La Haige, Netherlands.
- Millán, L.O.** (2013-2014) *Informes de Pruebas de Carga Dinámica y Estáticas a pilotes. Proyecto Muelle Granelero*. Caldera, Costa Rica.
- Millán, L.O.** (2014-2015) *Informes de Pruebas de Carga Dinámica y Estáticas a pilotes. Proyecto Muelle Petrolero*. Moín, Costa Rica.