

Caso de fundación profunda con pilotes prefabricados de hormigón armado y monitoreo mediante Pile Driving Analyzer.

Deep Foundation with driven precast concrete piles and monitoring with Pile Driving Analyzer

Tapia V. Nicolás¹; Cuitiño G., Matías²; Guzman G., Aldo³

¹Gerente técnico, Pilotes Terratest, ntapia@terratest.cl

²Ingeniero de Proyectos, Pilotes Terratest, mcuitino@terratest.cl

³Gerente General Regional, Pilotes Terratest, aguzman@terratest.cl

Resumen

Se presenta un caso práctico de fundación profunda de una planta industrial mediante pilotes prefabricados de hormigón armado, hincados en suelos arcillosos de muy baja compacidad ($N_{spt} < 5$ golpes/pie), utilizando equipamiento y métodos de última generación para este tipo de pilotes, de uso muy poco frecuente en Chile.

La integridad estructural de los pilotes y su capacidad geotécnica fueron monitoreadas mediante PDA (Pile Driving Analyzer) durante la hinca. Con los resultados del ensayo PDA en conjunto con la herramienta computacional GRLWEAP, se verificaron las hipótesis de diseño, logrando, durante la ejecución del proyecto, optimizar la profundidad de empotramiento y variar la cantidad de pilotes requerida.

Este caso práctico es exitoso y representa un hito dentro del abanico de soluciones disponibles en el mercado de fundaciones profundas en Chile, al usar de forma eficiente y moderna pilotes prefabricados de hormigón armado, tecnología que había caído en desuso en el país en las últimas décadas, confirmando las grandes ventajas de la misma.

Palabras claves: fundaciones, pilotes, hinca, hincabilidad, monitoreo, PDA.

Abstract

A practical case of deep foundation of an industrial plant is presented using precast reinforced concrete piles, driven into soft clays ($N_{spt} < 5$ blows/ft), using the latest technology in equipment and methods which are very rare in Chile.

The structural integrity of the piles and their geotechnical capacity were monitored by PDA (Pile Driving Analyzer) during driving. With the results of the PDA test, together with the GRLWEAP computational tool, the design hypotheses were verified. During the execution of the project, it was possible to achieve the optimization of the embedment depth and the variation of the number of piles required.

This is a successful case history and represents a milestone within the range of solutions available in the deep foundation market in Chile. Particularly, in using in an efficient and modern way precast reinforced concrete piles, a technology that had fallen into disuse in the country in recent decades, confirming the great advantages of this technology.

Keywords: deep foundations, pile, driven precast concrete, monitoring, pile driving analyzer.

1 Introducción

La hincada de pilotes prefabricados es una técnica de fundación profunda que se enmarca dentro del grupo denominado como “pilotes de desplazamiento total”, ya que su ejecución se realiza mediante la hincada en el terreno de elementos prefabricados de hormigón armado, normalmente de sección cuadrada o circular, aplicando impactos de energía controlada. Aprovechando la compresión en punta y el desplazamiento lateral que provoca su penetración en el terreno, genera una ganancia de resistencia en el pilote en comparación a un pilote preexcavado por la mejora del suelo circundante por densificación (Rhyner F., 2018 y Taiping Q. 1988). Los impactos controlados que son utilizados en la hincada provienen del uso de martillos de alta tecnología que son montados sobre grúas o piloterías especialmente diseñadas. Los martillos más usuales actualmente pueden ser hidráulicos o Diesel, y permiten variar la energía mediante el cambio de la masa o modificando su altura de caída.

Este informe trata sobre la utilización de pilotes prefabricados de hormigón armado para las fundaciones de un proyecto de naves industriales y estanques de acopio, ubicados en Puerto Natales, XII Región de Magallanes, Chile.

No contamos con registros de utilización de pilotes prefabricados de hormigón armado en Chile en los últimos 25 años. Los equipos y tecnología utilizados en este proyecto corresponden al estándar actual de la técnica y permiten grandes ventajas al poder alcanzar cargas más altas en los pilotes y poder medir su capacidad de carga e integridad con instrumentación como se ampliará más adelante.

El “mapeo geotécnico” relacionado a proyectos de pilotes hincados es el trabajo inmediatamente previo al inicio de la instalación de los pilotes del proyecto, mediante el cual se realiza un determinado número de ensayos dinámicos de alta deformación para determinar aspectos importantes como la definición de rechazo de un pilote, capacidad de carga, y la profundidad de hincada en cada sector en que se divide la obra.

El presente artículo muestra las principales ventajas obtenidas con el sistema de fundación profunda con pilotes prefabricados con las condiciones de borde de este proyecto y los resultados del proceso de mapeo y control geotécnico en Pilotes Hincados mediante Ensayos de Carga Dinámica de Alta Deformación. Estos pilotes fueron instrumentados y controlados mediante el PDA (Pile Driving Analyzer) (Candela J. et al 1992; Árcos J.L. et al 2007), dispositivo que reúne los componentes para procesar las señales de los sensores, almacenar y visualizar los datos

En general, la capacidad de carga de pilotes hincados puede ser estimada mediante las expresiones empíricas de hincada que parten de la medida del rechazo, el cual se define como el descenso permanente que sufre un pilote al recibir una cantidad determinada de golpes de cierta energía. En la literatura existen numerosas fórmulas propuestas por diferentes autores (p.e. FHWA, 2016), que dependen del peso del martillo, peso del pilote, altura de caída de la masa y rechazo medido. Estas formulaciones, que se basan en el principio de conservación de energía, permiten una estimación rápida, aunque requieren una calibración previa. Con el avance de la electrónica y la tecnología, el uso de estas fórmulas va siendo reemplazado por el análisis de hincada con equipos como el PDA.

El caso que se presenta en este artículo toma como lineamiento de diseño el manual de FHWA (2016), el cual permite definir el factor de seguridad geotécnico en base a un porcentaje mínimo de ensayos realizados sobre

la cantidad total de pilotes a ejecutar en todo el proyecto. En específico, para este proyecto que contempló realizar fundaciones en varias naves y estanques de acopio, se ensayaron el 2% de los pilotes ejecutados, lo cual permitió definir el factor de seguridad global equivalente de capacidad geotécnica de los pilotes a un $FS=2.15$.

2 Propagación de ondas, fundamento y metodología.

Los métodos de análisis de hincas de pilotes se basan en la ecuación de la onda de compresión o tracción que viaja a lo largo del pilote durante el proceso de hincas (Candela et al, 1996; FHWA, 2016).

El método CASE, desarrollado a mediados de los años 60 en Case Western Reserve University (Cleveland – Ohio) es un método de predicción de la capacidad portante del pilote basado en medidas tomadas por equipos electrónicos como el PDA en el mismo momento de la hincas. Este modelo considera una hipótesis de pilote uniforme, elástico y un comportamiento plástico ideal del suelo, obteniéndose la expresión general de consideraciones teóricas y experimentales, que expresan la resistencia del suelo RTL como una suma de dos componentes, una estática S y una dinámica D .

El método CASE expresa la resistencia como la suma de

$$RTL = S + D \quad (1)$$

$$RTL = \frac{1}{2} [F(t_1) + F(t_2)] + \frac{1}{2} [V(t_1) + V(t_2)] \left(\frac{EA}{C} \right) \quad (2)$$

Donde;

RTL = Resistencia del suelo durante la hincas

$F(t)$ = Fuerza en la cabeza del pilote en función del tiempo.

$V(t)$ = Velocidad en la cabeza del pilote en función del tiempo

t_1 = Tiempo elegido durante la hincas, por lo general el primer peak.

t_2 = Tiempo de reflejo del primer peak, input from pile toe (t_1+2L/C).

L = Longitud del pilote por debajo del punto de medición.

E = elastic modulus of pile material .

A = pile cross sectional area (in^2).

C = wave speed of pile material (ft/s).

El analizador de hincas (PDA) es un dispositivo que utiliza el método CASE para analizar las señales que recibe de los sensores de deformación (ϵ) y aceleración instalados en los pilotes y determina entre otros parámetros la resistencia movilizada del pilote en el terreno, energía transmitida al pilote, esfuerzos máximos de compresión y tracción generados dentro del pilote, ondas de velocidad y fuerza e integridad estructural.



Fig. 1 – Instalación y monitoreo Equipo PDA

A principio de los 70, se desarrolló un programa de cálculo denominado CAPWAP (Programa Case de Análisis de Onda en Pilotes) (Holeyman, 1992). CAPWAP es un software que mediante un proceso iterativo (Signal Matching) permite simular señales similares a las capturadas con el PDA durante el registro. De esta igualación de señales se obtienen los distintos parámetros estáticos y dinámicos del suelo, como también la resistencia del pilote, entre otros.

CAPWAP (CW) se basa en un modelo matemático que discretiza el sistema martillo-pilote-suelo en segmentos continuos y uniformes (elementos finitos), asociando a cada uno un modelo de resorte elasto-plástico y un amortiguador. CAPWAP usa como “input” la onda descendente medida (WD_m) para poner en movimiento el modelo del pilote (ver fig. 2), y calcula una onda ascendente WU_c y la compara con WU_m (medida por el PDA) en el tiempo $2L/c$. Así se van ajustando los parámetros del modelo iterativamente hasta que WU_c y WU_m se asemejen.

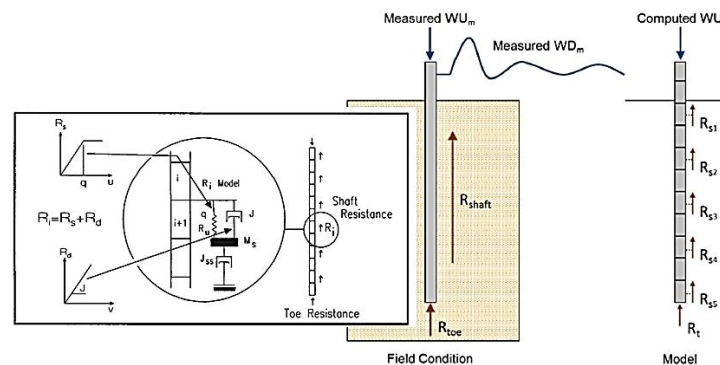


Fig. 2 – Modelo martillo pilote punta empotrada (FHWA 2016)

3 Proyecto

El presente caso corresponde a la fundación profunda de una planta industrial en Puerto Natales y ubicada a metros del mar.

De acuerdo con el estudio geotécnico, el subsuelo se encontraba conformado en su estrato superior mayormente por depósitos de arcilla blanda a muy blanda denominado Mazacote, muy característico en la

región de Magallanes (Donoso y Avalos, 2006), cuyo espesor promedio alcanzaba hasta una profundidad variable de hasta 28 m desde la plataforma de trabajo. La arcilla presentaba valores de NSPT de 0 a 3 golpes, con $\gamma = 1.8 \text{ ton/m}^3$ y $S_u = 0.04$ a 2.0 ton/m^2 , habiendo incluso observado que las barras del ensayo descendían por peso propio en algunos tramos. Subyaciendo a la arcilla se encuentra un depósito de grava limo-arcillosa de buenas características geotécnicas y apto para empotrar la punta del pilote, con valores de NSPT > 60 golpes, $\gamma = 2.1 \text{ ton/m}^3$, $\phi = 40^\circ$.

La presencia de una arcilla con alta deformabilidad obligaba a adoptar una solución que controlara o redujera los asentamientos esperables para las estructuras y en particular para los tanques del proyecto. Alternativas con columnas de grava no permitían reducir los asentamientos al nivel requerido para el proyecto.

Dada la ubicación geográfica de la obra, el uso de pilotes preexcavados hormigonados “in situ” no era una solución competitiva por el alto costo del suministro de hormigón. Por lo tanto, se propuso la utilización de Pilotes Hincados Prefabricados de Hormigón Armado de sección $27 \times 27 \text{ cm}$ que eliminaba muchos problemas logísticos.

La capacidad estructural minorada de los pilotes de acuerdo con la norma ACI 318, utilizando concreto de resistencia de 50 Mpa , se calculó en 234 ton , mientras que la capacidad minorada a tracción, utilizando acero con fluencia 420 Mpa , se determinó en 64 ton . Los pilotes son prefabricados en longitudes de hasta 12 m de largo, lo cual facilita su transporte y manejo en obra, pero hace necesario el uso de juntas rápidas especiales para unir tramos de pilotes. Estas juntas de acero están formadas por piezas metálicas prefabricadas unidas por un sistema de clavijas y pasadores de acuerdo a la norma EN 12794 (Fig. 4), con resistencia última a tracción de 57 ton .

Para el proyecto de estudio, se utiliza un martillo hidráulico marca Junttan HHK7-9A con masa de 7 toneladas, permitiendo controlar y regular su altura de caída hasta los 1.2 m y controlar la frecuencia de los golpes. El martillo fue montado sobre un equipo de pilotaje sobre orugas Bauer BG28 de última generación, facilitando su movilidad en la obra y el guiado de los tramos de pilote a hincar con el mástil del equipo.

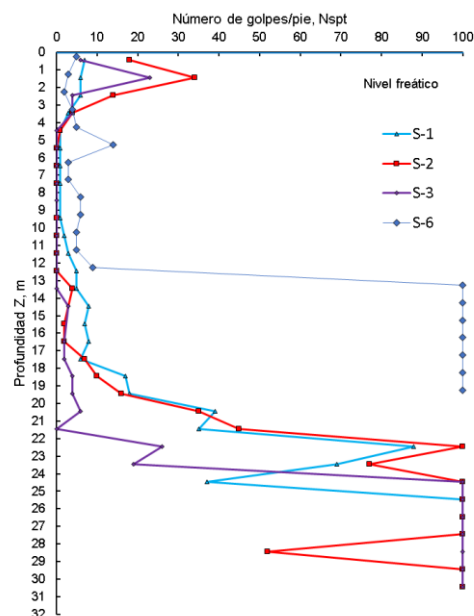


Fig. 3 – Sondajes

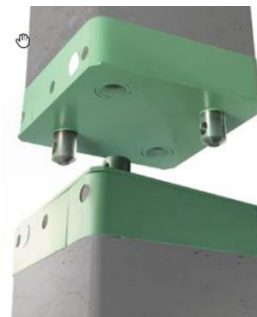


Fig. 4 – Junta rápida para pilote prefabricado según norma EN 12794

3 Monitoreo Geotécnico

Para la etapa de mapeo previo se utilizó el equipo PDA, con el cuál se tomaron lecturas de las deformaciones y aceleraciones que ocurren en el pilote mediante el uso de acelerómetros y deformímetros, lo cual permite inferir las tensiones que tienen ocurrencia dentro del pilote por efecto de la hincada, y mediante el uso de la ecuación de onda estima in situ la integridad del pilote y su capacidad portante, lo cual permite definir criterios de rechazo, validar o verificar las hipótesis de diseño del proyecto y determinar la profundidad de hincada en cada sub-sector del proyecto.

En la Fig. 5 se muestra el plan del mapeo para una de las naves industriales del proyecto en estudio, del cual, según lineamientos de la FHWA (2016), se debe realizar Ensayos de Carga Dinámica de Alta Deformación al 2% de los pilotes ejecutados del proyecto (16 pilotes para esta nave).

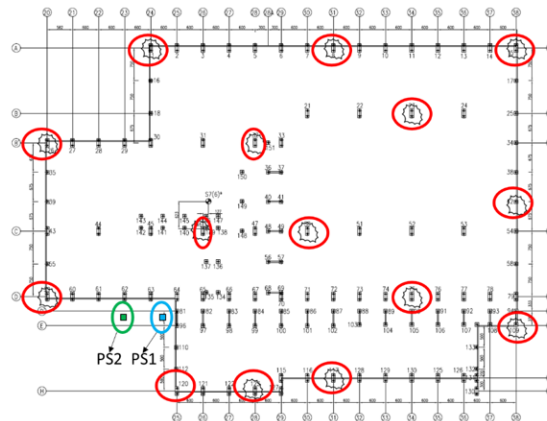


Fig. 5 – Vista en planta Nave de Industrial 01, Pilotes instrumentados con PDA en etapa de mapeo.

El principal objetivo del monitoreo con PDA es verificar la capacidad de carga última del pilote en un proceso de hincada directa, sin llegar a superar su capacidad estructural. Por otro lado, el monitoreo sirve para determinar el largo requerido de los pilotes en cada sector. Luego, realizando un modelo 3D con todos los pilotes del mapeo es posible interpolar la profundidad esperable del resto de los pilotes en cada punto, lo cual supone un beneficio importante en términos de costos en la utilización de tramos de pilotes y pérdidas de longitud por descabezado.

Las mediciones de deformación y aceleración fueron tomadas por debajo de la cabeza del pilote, en un punto ubicado a 75cm por debajo de la cabeza del pilote. Dos deformímetros y dos acelerómetros piezo-resistivos fueron fijados en los lados opuestos de los pilotes para ese fin (Fig 6).

Además, como parte del proceso de mapeo, se seleccionaron 7 pilotes al azar a los cuales se les realizó rehincada instrumentada, esto con la finalidad de cuantificar la ganancia producto del acomodamiento del suelo circundante al pilote (ganancia de fuste). Esto último se complementa con la resistencia en punta y también permite optimizar la longitud final del pilote. Estos ensayos de rehincada se realizaron a 24h, y 7 días (ver tabla 1).



Fig. 6 – Vista en plata Nave de Industrial, Pilotes instrumentados con PDA en etapa de mapeo

Tabla 1: Recuperación del suelo (cargas de fuste medidas)

Pilote	Inca directa [kN]	Rehinca a 7 días [kN]
32A	250	550
59B	350	480
62	200	310
64	315	520
109B	270	510
117B	360	480
120B	320	430

Se evidencia la recuperación del suelo representada por un valor promedio de aproximadamente de 1.6 (“SETUP” = ganancia de resistencia en relación con la resistencia al final de la hinca) entre los días 1 y 7. La resistencia por fricción ganada promedió 170kN. El valor de SETUP obtenido del proceso de rehinca es menor al utilizado en la simulación de hincabilidad previa (SETUP= 2.0) (Thendean G., Rausche F & Likins G 2005). Sin embargo, la menor ganancia medida por fuste fue compensada por la mayor capacidad de punta alcanzada en la grava.

Para el caso del Pilote 117B, ver fig. 7, se presenta una comparación de las curvas medidas con PDA (método CASE) en hinca directa (día 1) y rehinca (día 7), bajo las mismas condiciones de masa y altura de caída de la masa. La curva continua representa la fuerza aplicada por el martillo al pilote, y la línea segmentada representa la velocidad (integración de aceleración) de la onda que se propaga. Se puede apreciar que ambas curvas representan una condición de pilote empotrado, ya que ambas, velocidad y fuerza, se mantienen iguales hasta una condición 2L/C (punta del pilote), separándose abruptamente en este punto, donde la fuerza aumenta debido a la condición de empotramiento y la velocidad cae. La separación entre curvas, fuerza y velocidad antes de 2L/C corresponde a la dimensión de fricción del estrato de arcilla, que apreciablemente aumenta en la rehinca producto del reacomodo del suelo circundante al pilote y a la disipación de presiones de poro.

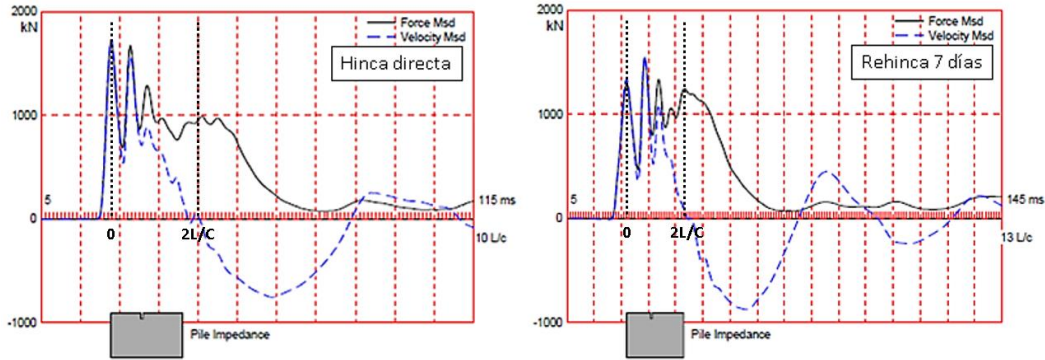


Fig. 7 – Curvas Velocidad/Fuerza Pilote 117B.

Las señales son analizadas con CAPWAP, pudiendo constatar que el proceso iterativo tiene un buen ajuste entre las curvas de carga aplicada medida y simulada (ver fig. 8). De las simulaciones con “signal matching” se obtiene la curva carga deformación del pilote mostrada en la fig. 9, en donde 1280kN corresponden a la capacidad de punta y 480kN corresponde a la capacidad de fuste del pilote, sumando una capacidad última de 1760kN.

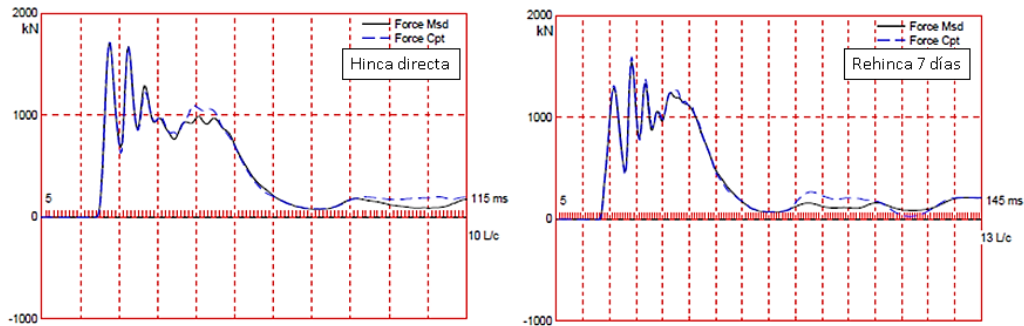


Fig. 8 – Simulaciones CAPWAP Pilote 117B

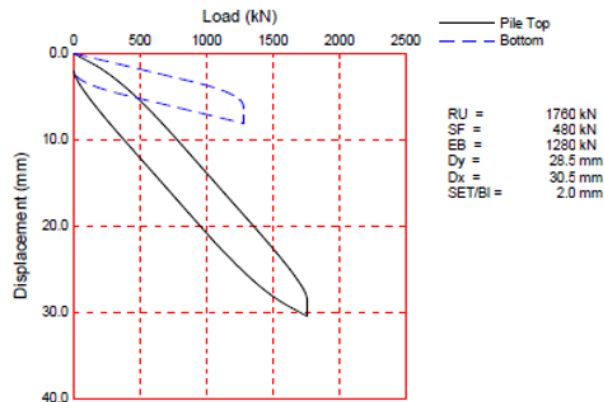


Fig. 9 – Simulación Carga-Deformación CAPWAP Pilote 117B

En 16 ensayos realizados con PDA en una de las naves, los esfuerzos máximos durante la hinca en la parte superior del pilote (CSX) medidos por el PDA alcanzaron valores máximos de 36Mpa. Los valores máximos

recomendados por la norma europea EN 12699 en pilotes de hormigón armado son del 90% del F_c (40Mpa). A pesar de las altas tensiones de compresión durante la hincada, cercanas al límite, no se evidenció rotura de pilotes. Los esfuerzos máximos de tracción recomendados por la EN 12699 según el tipo de acero utilizado es de 7.3Mpa, evidenciándose máximos en las pruebas del orden de los 7.8Mpa, los cuales estuvieron levemente sobre el límite de los esfuerzos recomendados. Todo lo anterior fue controlado por el ingeniero de terreno con tal de llevar al límite de la capacidad a todos los pilotes de prueba, sin poner en riesgo la integridad estructural de los pilotes.

4 Estructuración de la fundación con pilotes hincados

La estructura de la planta se diseñó de tal forma que los pilares descargaban en zapatas o cabezales de hormigón armado apoyados sobre varios pilotes. En caso de utilizar menos de tres pilotes por zapata, se utilizaron riostras para poder controlar los momentos en el sentido perpendicular al eje que une dos pilotes.

En caso de esfuerzos horizontales elevados, como por ejemplo en la zona de tanques del proyecto, y dada la baja capacidad de tomar momentos de los pilotes hincados por su pequeña sección (27x27) se diseñaron pilotes inclinados, siendo posible un diseño sumamente eficiente de la fundación.

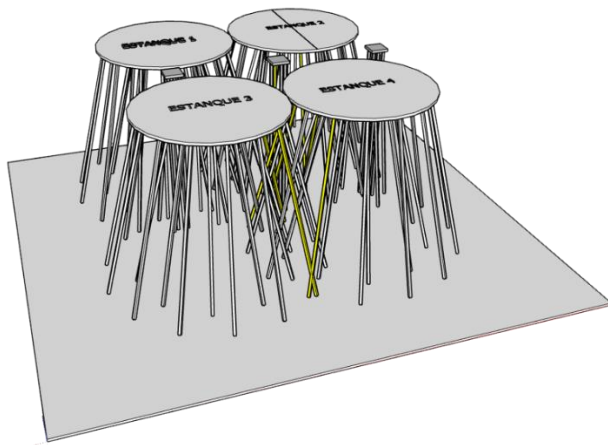


Fig. 10 – Hincada de pilotes inclinados para absorber esfuerzos horizontales

5 Conclusiones

La utilización de pilotes hincados prefabricados de hormigón armado permitió resolver eficientemente y de forma muy controlada la fundación profunda de una planta industrial en un terreno con muy baja calidad geotécnica y condiciones de borde que hacían muy costosa otra solución.

La integridad estructural de los pilotes y su capacidad geotécnica fueron monitoreadas mediante el equipo PDA (Pile Driving Analyzer) a través de ensayos dinámicos de alta deformación, los que permitieron visualizar la

integridad estructural del pilote, capacidad de carga, rendimiento del martillo y tensiones de compresión y tracción en los pilotes, entre otros.

El mapeo permite tener una visualización de la profundidad del suelo competente, permitiendo en algunos casos disminuir la longitud de los tramos a prefabricar, lo que representa un considerable ahorro en costos de hormigón y juntas. Además, el mapeo permitió definir una condición de rechazo que permitiese acortar los plazos del proyecto y por sobre todo no correr riesgos de sobrepasar la capacidad estructural de los pilotes producto excesos de tensiones producto del hincado.

El uso de pilotes prefabricados en el proyecto fue un éxito por la eficiencia de la solución en costos, plazos y resultado técnico. La importante cantidad de ensayos dinámicos de gran deformación (24 en total) que se pudieron realizar en la etapa de mapeo se tradujo en beneficios económicos importantes tanto en materias primas como en logística, pero también aportó una gran seguridad al proyecto dada la gran cantidad de ensayos realizados, limitándose las incertidumbres propias de otras tecnologías que requieren ensayos estáticos, que muchas veces representan un elevado costo y conllevan detrás gran logística.

El primer proyecto ejecutado de pilotes hincados prefabricados de hormigón armado después de varias décadas es un hito dentro del abanico de soluciones presentes en el mercado de fundaciones profundas en Chile.

5 Referencias

- Rhyner F. (2018). Densification of Granular Soil by Pile Driving and Implications for Evaluation of Liquefaction. IFCEE 2018 GSP 294.
- Taiping Q. & Huishan L. (1988). Influence of Pile Driving on Characteristics of Liquefiable Soils, Missouri University S&T. International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering.
- Thendean G., Rausche F & Likins G (2005). Wave Equation Correlation Studies. Reference Paper <http://www.pile.com/education/sw4/default.asp?Company=>
- Candela J. & Sainz B. (1992). Ensayos Dinámicos de carga en pilotes prefabricados hincados para la cimentación de estructuras en la Isla de la Cartuja. Expo 1992 – Sevilla
- Árcos J.L. & De Juan M.G. (2007). Pilotes Prefabricados: Una solución óptima para cimentaciones profundas. ISSN: 0008-8919
- Donoso, P. & Avalos, C. (2006). Caracterización Geotécnica y Geomecánica del suelo fino de Punta Arenas denominado Mazacote. Tesis de Grado, Universidad de Magallanes.
- Holeyman, A. (1992). Technology of pile dynamic testing, Keynote lecture. In Proc. of the 4th Int. Conf. of Application of Stress-wave Theory to Piles (pp. 195-215).
- Bolomey, H. (1971). Fórmulas de Penetración Dinámica. Publicación Revista Obras Públicas Núm. 3080 diciembre 1971. PT-2.
- DS/EN 1997-1-1 (2007). Eurocode 7: geotechnical design – part 1: general rules. Copenhagen: Danks Standard.
- FHWA (2016): Design and Construction of Driven Pile Foundations, Volumen I, II & III.