



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

Deep foundation with driven precast concrete piles and monitoring with Pile Driving Analyzer PDA

Fecha de entrega: 25 de enero 2022

Fecha de aceptación: 12 de abril 2022

Nicolás Tapia, Matías Cuitiño y Aldo Guzmán

Pilotes Terratest, Alonso de Córdova 5151, of. 1401, Las Condes, Región Metropolitana, Chile, ntapiavalencia@gmail.com, mcuitino@terratest.com, ag@terratest.cl

Se presenta un caso de fundación profunda para una planta industrial en Puerto Natales mediante pilotes prefabricados de hormigón armado, hincados en suelos arcillosos de muy baja compactación ($N_{spt} < 5$ golpes/pie). Se utiliza equipamiento y métodos para evaluar la integridad estructural de los pilotes y su capacidad geotécnica mediante monitoreo con PDA (Pile Driving Analyzer) durante la hinca. Con los resultados del ensayo PDA en conjunto con la herramienta computacional CAPWAP, se verificaron las hipótesis de diseño, logrando, durante la ejecución del proyecto, optimizar la profundidad de empotramiento y variar la cantidad de pilotes requerida.

Palabras claves: fundaciones profundas, pilote de hormigón prefabricado hincado, monitoreo, PDA

A practical case of deep foundation for an industrial plant in Puerto Natales is presented using precast reinforced concrete piles, driven into soft clays ($N_{spt} < 5$ blows/ft). Equipment and methods were used for the evaluation of the pile structural integrity and their geotechnical capacity by means of PDA monitoring (Pile Driving Analyzer) during driving. With the results of the PDA test, together with the CAPWAP 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.

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

Introducción

La hinca de pilotes prefabricados de hormigón armado 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 hinca 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 (e.g. Rhyner, 2018; Taiping y Huishan, 1988). Los impactos controlados que son utilizados en la hinca provienen del uso de martillos de alta tecnología que son montados sobre grúas o piloteras 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 artículo 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, 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 hinca 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 sistema PDA (Pile Driving Analyzer; Candela y Sainz, 1993; Arcos y de Juan, 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 hinca 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 (*e.g.* 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 hinca con equipos como el PDA que utiliza el principio de propagación de ondas.

El caso que se presenta en este trabajo 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 $FS = 2.15$.

Propagación de ondas, fundamento y metodología.

Los métodos modernos de análisis de hinca de pilotes se basan en la ecuación de propagación de ondas de compresión o tracción que viaja a lo largo del pilote durante el proceso de hinca (Smith, 1960; Candela y Sainz, 1993; FHWA, 2016).

El método CASE, desarrollado a mediados de los años 60 en Case Western Reserve University (Cleveland OH, EEUU) es un método de predicción de la capacidad portante del pilote basado en mediciones tomadas por equipos electrónicos como el PDA en el mismo momento de la hinca. 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 RLT como una suma de dos componentes, una estática S y una dinámica D .

El método CASE expresa la resistencia estática S y dinámica D de la siguiente forma:

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

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

donde RLT es la resistencia total del suelo durante la hinca, $F(t)$ es la fuerza en la cabeza del pilote en función del tiempo, $V(t)$ es la velocidad en la cabeza del pilote en función del tiempo, t_1 es el tiempo elegido durante la hinca, por lo general el primer peak, t_2 es el tiempo de reflejo del primer peak, desde la punta del pilote ($t_1 + 2L/c$), L es la longitud del pilote por debajo del punto de medición, E es el módulo elástico del material del pilote, A es el área de la sección transversal del pilote y c es la velocidad de la onda de propagación en el pilote. El analizador de hinca (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, tal como se muestra en la Figura 1. Se pueden determinar, 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, velocidad de propagación de ondas de velocidad y fuerza e integridad estructural.

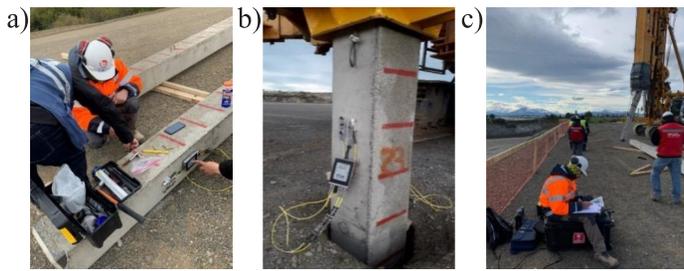


Figura 1: a) Instalación sensores, b) instalación pilote y c) monitoreo con equipo PDA

A principio de los años 1970, se desarrolló un programa de cálculo denominado CAPWAP (case pile wave analysis program) (Goble y Rausche, 1970; Rausche *et al.*, 1972). 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 Figura 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.

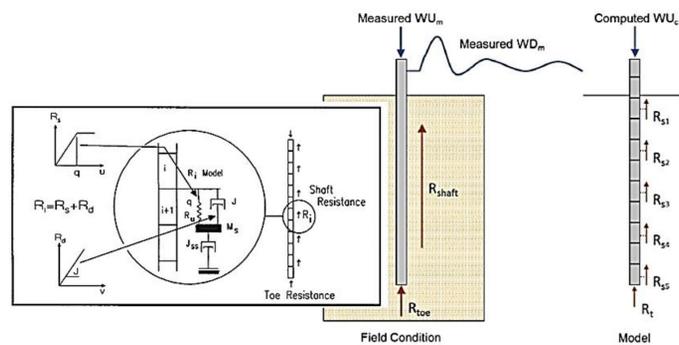


Figura 2: Modelo martillo y pilote en el método de igualación de señal CAPWAP (FHWA, 2016)

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 alcanzaba una profundidad variable de hasta 28 m desde la plataforma de trabajo. La arcilla presentaba valores de N_{spt} de 0 a 7 golpes/pie, con varios puntos con cero golpes/pie, con $\gamma = 1.8 \text{ ton/m}^3$ y $s_u = 2$ a 57 kN/m^2 (caracterizada en promedio con $s_u = 20 \text{ kN/m}^2$) 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 $N_{spt} > 60$ golpes/pie, $\gamma = 2.1 \text{ ton/m}^3$, $\phi' = 40^\circ$.

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 precavados 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 ACI318 (2019), utilizando hormigón 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 41 ton. Los pilotes son prefabricados en longitudes de tramos 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 (2005), como se puede apreciar en la Figura 4. La resistencia última a tracción es de 98 ton (carga máxima a tracción admisible durante la hincada de 88 ton). Para el proyecto de estudio, se utiliza un martillo hidráulico marca Junttan HHK7-9A con masa de 7 ton, 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.

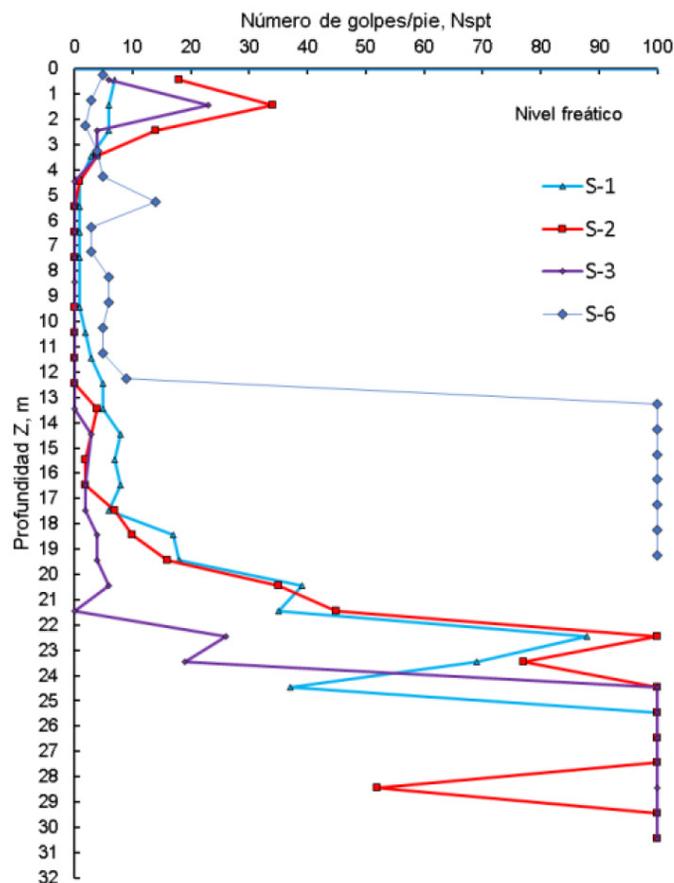


Figura 3: Variación de Nspt con la profundidad



Figura 4: Junta rápida para pilote prefabricado según norma EN 12794 (2005)

Monitoreo geotécnico

Para la etapa de mapeo previo se utilizó el equipo PDA, con el cual 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 hinca. Mediante el uso de la ecuación de onda, se 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 hinca en cada sub-sector del proyecto.

En la Figura 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).

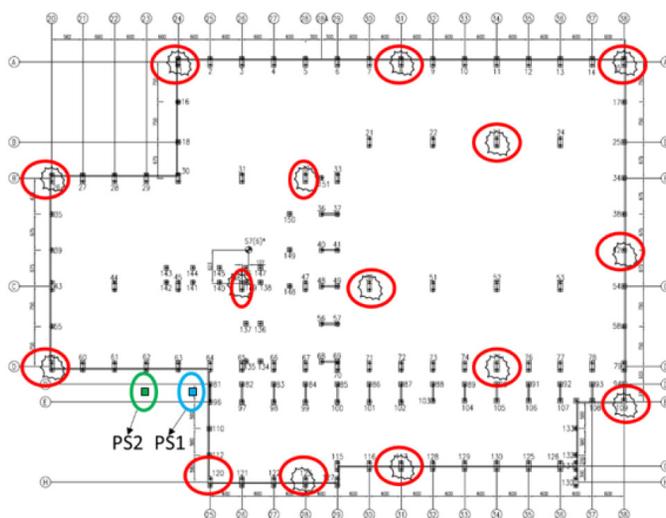


Figura 5: Vista en planta nave industrial 01, en círculos se indican los pilotes instrumentados con PDA en etapa de mapeo.

El principal objetivo del monitoreo con PDA es verificar la capacidad de carga última del pilote en un proceso de hinca 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, lo cual permite optimizar el diseño. 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 75 cm 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 como se puede ver en la Figura 6.

Además, como parte del proceso de mapeo, se seleccionaron 7 pilotes al azar a los cuales se les realizó rehinca 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 rehinca se realizaron a 24 h y 7 días (ver Tabla 1).

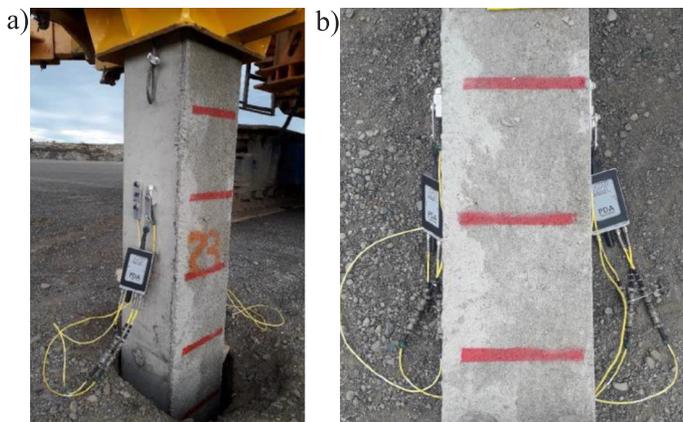


Figura 6: Instrumentación instalada en el pilote: a) vista lateral y b) vista frontal

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

Pilote	Hinca directa, kN	Rehinc 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 1.6 entre los días 1 y 7, a lo cual se denomina SETUP, es decir, ganancia de resistencia en relación con la resistencia al final de la hinca inicial. La resistencia por fricción ganada promedió fue de 170 kN. El valor de SETUP obtenido del proceso de rehinca fue algo menor al utilizado en la simulación de hincabilidad previa (SETUP = 2.0) (Thendean *et al.*,

1996). 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, en la Figura 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 la 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 cerca del tiempo $2L/c$ (L es la profundidad de la punta del pilote), separándose abruptamente poco antes de este punto, donde la fuerza aumenta debido a la condición de empotramiento y la velocidad cae.

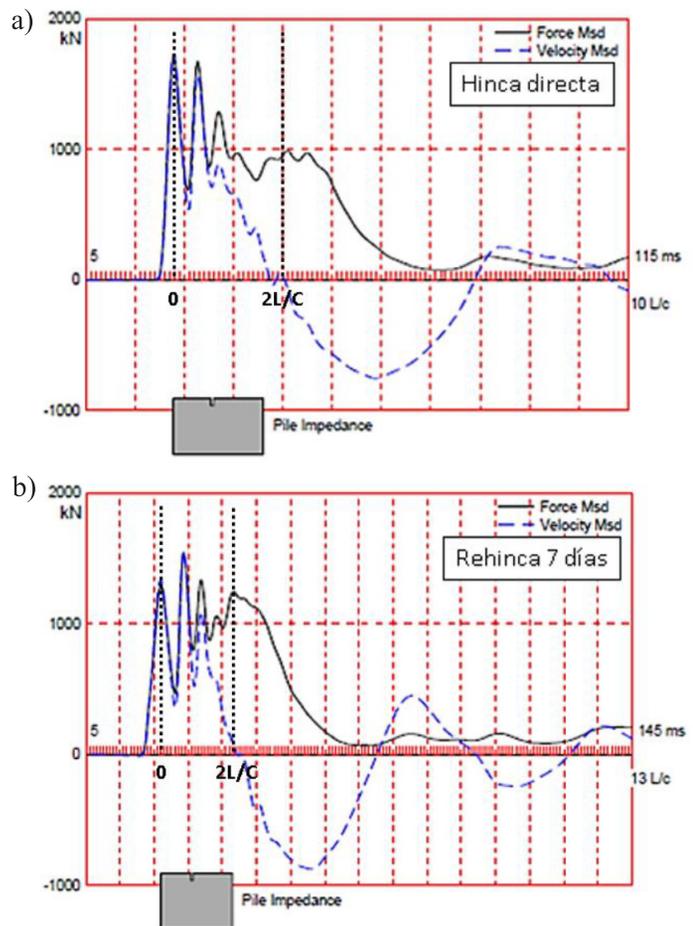


Figura 7: Curvas de velocidad/fuerza versus tiempo para el pilote 117B: a) hinca directa y b) rehinc a 7 días



Las señales obtenidas con los sensores fueron analizadas con CAPWAP, pudiendo constatar que el proceso iterativo tuvo un buen ajuste entre las curvas de carga aplicada medida y simulada, como se puede apreciar en la Figura 8. De las simulaciones con “signal matching” se obtiene la curva de carga versus deformación del pilote mostrada en la Figura 9, en donde 1280 kN corresponden a la capacidad de punta y 480 kN corresponde a la capacidad de fuste del pilote, sumando una capacidad última de 1760 kN.

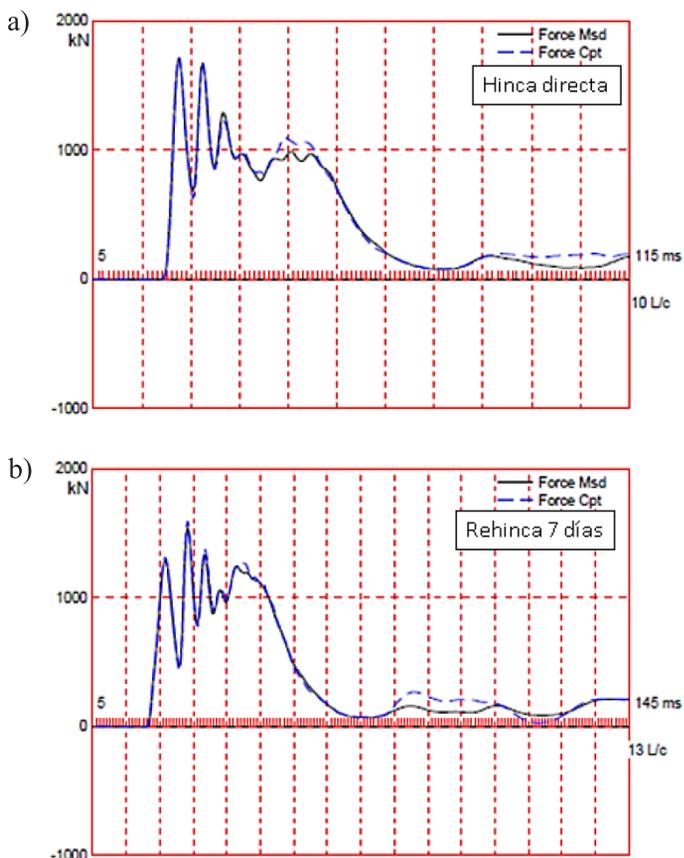


Figura 8: Simulaciones CAPWAP para el pilote 117B: a) hincia directa y b) rehinca en 7

En 16 ensayos realizados con PDA en una de las naves, los esfuerzos máximos durante la hincia en la parte superior del pilote (CSX) medidos por el PDA alcanzaron valores máximos de 36 MPa. Los valores máximos recomendados por la norma europea EN12699 (2015) en pilotes de hormigón armado son del 90% del f_c (40 MPa). A pesar de las altas tensiones de compresión durante la hincia, cercanas al límite, no se evidenció rotura en los pilotes. Los esfuerzos máximos de tracción recomendados por la EN12699 (2015) según el tipo de acero utilizado es de 7.3 MPa, evidenciándose máximos en las pruebas del orden

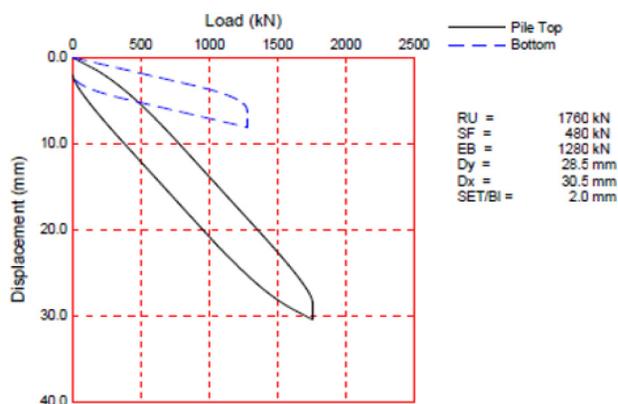


Figura 9: Simulación carga-deformación CAPWAP para el pilote 117B

de los 7.8 MPa, 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.

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 (27 x 27 cm) se diseñaron pilotes inclinados como se observa en la Figura 10, siendo posible un diseño eficiente de la fundación.

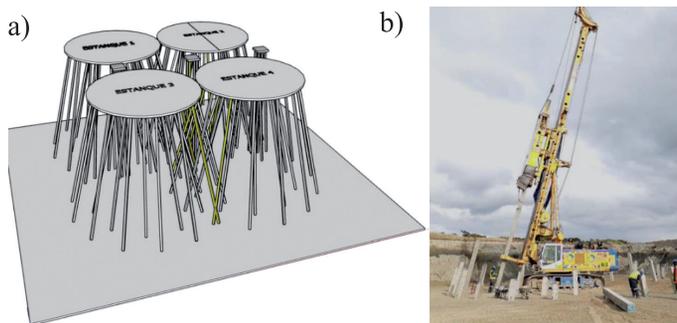


Figura 10: a) Pilotes inclinados para absorber esfuerzos horizontales y b) hincia de pilotes inclinados



Conclusiones

Este artículo describe el primer proyecto ejecutado de pilotes hincados prefabricados de hormigón armado después de varias décadas, lo cual es un hito dentro del abanico de soluciones de fundaciones profundas disponibles en Chile.

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 suelos de muy baja resistencia y condiciones geográficas y 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. El monitoreo permite comprobar 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 monitoreo 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 de tensiones excesivas a compresión o tracción producto del hincado.

El uso de pilotes prefabricados en el proyecto generó una 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 monitoreo 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.

Referencias

ACI318 (2019). *Building code requirements for structural concrete and commentary*. American Concrete Institute, Farmington Hills MI, USA

Arcos, J.L. y de Juan M.A. (2007). Pilotes prefabricados: Una solución óptima para cimentaciones profundas. *Prefabricados de Hormigón*, Asociación Nacional de la Industria del Prefabricado de Hormigón ANDECE, Madrid, España, 6-19

Candela, J. y Sainz, B. (1993). Ensayos dinámicos de carga en pilotes prefabricados hincados para la cimentación de estructuras en la Isla de la Cartuja (Expo'92 – Sevilla). *Ingeniería Civil* **90**, 33-55

Donoso, P.A. y Avalos, C.A. (2006). Caracterización geotécnica y geomecánica del suelo fino de Punta Arenas denominado Mazacote. *Trabajo de título de Constructor Civil*, Universidad de Magallanes, Chile

EN12794 (2005). *Precast concrete products. Foundation piles*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN12699 (2015). *Execution of special geotechnical works. Displacement piles*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

FHWA (2016). *Design and construction of driven pile foundations*. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington DC, USA, FHWA-NHI-16-009 (vol. 1), 16-010 (vol. 2), 16-064 (vol. 3)

Goble, G.G. and Rausche, F. (1970). *Pile load test by impact driving*. Highway Research Record, Highway Research Board, No. 333, Washington DC, USA, 123-129

Rausche, F., Moses, F. and Goble, G.G. (1972). Soil resistance predictions from pile dynamics. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* **98**(9), 917-937

Rhyner, F.C. (2018). *Densification of granular soil by pile driving and implications for evaluation of liquefaction*. *International Foundation Conference and Equipment Expo IFCEE 2018*, ASCE GSP 294, Orlando FL, USA, 284-300

Smith, E.A.L. (1960). *Pile driving analysis by the wave equation*. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division* **86**(4), 35-61

Taiping, Q. and Huishan, L. (1988). Influence of pile driving on characteristics of liquefiable soils. *2nd International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. Missouri University S&T, St. Louis MO, USA, 765-768

Thendean, G., Rausche, F., Likins, G. and Svinikin, M. (1996). *Wave equation correlation studies*. *5th International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*. F. Townsend, M. Hussein, and M. McVay (eds.), University of Florida, Gainesville FL, USA, 144-162