

Aplicação de testes de arrancamento para comprovação da capacidade de carga das fundações de usinas solares fotovoltaicas

Aplicación de pruebas de extracción para comprobar la capacidad de carga en cimentaciones en plantas fotovoltaicas

Jaime Leonel Fora

Ingeniero Civil, Lima, Perú, jaime.fora.n@uni.pe

Gino Omar Calderón Vizcarra

Docente, Universidad Católica San Pablo, Arequipa, Perú, ginocalderon@hotmail.com

RESUMEN: En la actualidad la cimentación de una planta solar requiere la instalación de una gran cantidad de pilotes metálicos o “hincas”. En un proyecto fotovoltaico de 50 MW, construido en Chile el año 2022, se instalaron 10.311 pilotes metálicos (perfil W8x13 ASTM A6/A6M, longitud 3,71 m) repartidos en una extensión de 200 Has. Para comprobar la capacidad de carga de diseño de los pilotes hincados se planteó una metodología basada en pruebas de extracción (*Pull Out Test* en inglés) con el objetivo de identificar las áreas de suelo potencialmente aptas para hincado y medir la capacidad de carga de una muestra de 21 pilotes hincados en suelos aptos. Los resultados obtenidos determinaron que el 99% del área potencialmente apta era útil para el hincado directo. Este proceso utilizado generalmente por fabricantes de estructuras para paneles solares, contempla la acción de cargas permanentes y de viento, por ello, requiere pruebas de carga lateral y axial (tracción y compresión). Durante el proceso constructivo, se instalaron todos los pilotes dentro de áreas de suelo aptas, obteniendo resultados satisfactorios y un buen nivel de confiabilidad, esto asegura que los pilotes hincados serán capaces de soportar los esfuerzos últimos de diseño.

PALABRAS CLAVE: Pilotes, Hincas metálicas, Capacidad de carga, Prueba de carga, Resistencia en el fuste, Parámetros Geotécnicos, Ensayos de Laboratorio.

1. INTRODUCCIÓN

En la última década el uso de energías renovables se ha extendido notablemente en el mundo. Brasil y Chile lideran la capacidad instalada de energía fotovoltaica en Sudamérica. Las proyecciones de crecimiento son alentadas por el cambio climático. Esto implica la construcción de un mayor número de plantas solares o parques fotovoltaicos. En la actualidad, la cimentación de una planta solar requiere la implantación de un gran número de pilotes metálicos o “hincas” repartidos en áreas extensas.

Evaluaremos la construcción de una planta solar de 50 MW construida en Chile el año 2022, cuya cimentación requirió la instalación de 10.311 pilotes repartidos en una extensión de 200 Has. Los pilotes metálicos de perfil W8x13, se hincaron directamente en el suelo, hasta una profundidad no menor de 2 m. La comprobación de la capacidad de carga de los pilotes hincados, representó un reto geotécnico. La enorme cantidad hacía inviable una evaluación integral.

Tómese en cuenta que no existe una normativa para la ejecución de ensayos de pruebas de carga estática o dinámica de pilotes en cantidades masivas. En países como Perú, Chile o España, las normas, códigos y/o reglamentos recomiendan el planteamiento de metodologías específicas. En este escenario, se planteó una metodología para evaluar la capacidad de carga estática mediante pruebas de extracción, aplicando las normas ASTM D3689-07 y D3966-07 (ASTM internacional, 2010). Esta metodología, utilizada generalmente por fabricantes de estructuras metálicas, considera dos aspectos: un estudio geotécnico para la identificación de áreas de suelo con capacidad para el hincado directo y la ejecución de pruebas de extracción de una muestra representativa de pilotes, hincados en suelos geotécnicamente aptos. Las pruebas se realizan directamente sobre cada pilote instalado, mediante la aplicación de cargas, horizontal y axial (tracción y compresión). El resultado de las pruebas determinará la magnitud de la capacidad de carga de los pilotes y la competencia del suelo alrededor de estos. Con la información obtenida se puede empezar la etapa de proceso constructivo.

2. IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS PARA HINCADO

2.1. Ubicación del proyecto

La planta solar se encuentra ubicada en el desierto de Atacama, en Antofagasta (Chile), tiene una extensión de 200 Has., como se observa en la Figura 1. Para la cimentación se hincaron 10.311 pilotes o “hincas” que unidos en grupos de 7 unidades forman parte de 1473 estructuras metálicas que sostienen 132.000 paneles. La potencia instalada de esta planta es de 57 MW.



Figura 1. Vista panorámica de la planta solar.

2.2. Geología y geomorfología regional y local

A escala regional la zona de estudio se encuentra en la cuenca del río Loa, en una zona fisiográfica de depresión central, surcada por multitud de cerros y valles de carácter aluvial. Se caracteriza por ser una planicie de sedimentación árida, con gran cantidad de salares presentando un acusado endorreísmo. Las unidades geotécnicas (U.G.) detectadas en la zona son: depósitos aluviales (PLHa), formación Quillagua (Pq), depósitos aluviales del Mioceno-Plioceno (MPa), formación El Batea (Mmeb) y estratos de Confluencia (Oc).

El clima es desértico y extremadamente seco, con una pluviometría anual de 0.00 mm. Sin embargo, se han encontrado formaciones geomorfológicas típicas de lluvias torrenciales con periodos de recurrencia muy elevados, como cauces estacionales eminentemente erosivos que surcan la zona de influencia del proyecto.

2.3. Investigación geotécnica

El estudio geotécnico con fines de cimentación de plantas solares contempla la exploración y caracterización del suelo mediante calicatas, ensayos de laboratorio y prospección a base de sondeos “in situ”, esto con el fin de determinar las propiedades geológicas y geotécnicas del suelo. Mediante correlación se puede identificar las áreas de suelo superficial aptas para el hincado directo de pilotes, con suficiente resistencia para soportar las cargas de servicio. En estos proyectos se descartan los suelos de baja o muy baja resistencia por el elevado coste de cimentación de tipo convencional, así como suelos compactos de alta o muy alta resistencia porque impiden el hincado directo y demandan el uso de perforación previa (*pre-drilling*).

En la etapa de exploración se identificaron 7 puntos de observación geomorfológica (POG) para identificar las unidades geotécnicas (U.G.), se realizaron 12 calicatas (TP), 10 ensayos con penetrómetro dinámico de energía variable “Panda” (PD) para estimar la resistencia del terreno y otros parámetros obtenidos por correlación (cohesión, ángulo de fricción, módulo de elasticidad, CBR, entre otros), 5 ensayos de resistividad eléctrica (ERT) para identificar la profundidad y espesor de los estratos de suelo, y ensayos de laboratorio (clasificación SUCS, humedad, granulometría y límites de Atterberg). En la Figura 3 se observa la distribución de estos ensayos en el área de estudio.

En la Tabla 1 se puede observar los principales parámetros geotécnicos correlacionados en base a las unidades geotécnicas. El terreno se ha subdividido en dos grupos con características geotécnicas bien diferenciadas:

- **Sustrato Consolidado:** Abarca las unidades geotécnicas Formación Quillagua (Pq), Mioceno (MPa), y Formación El Batea (Mmeb). Son suelos con compacidad medianamente densa a muy densa, con diferentes grados de cementación en base al contenido en sales y carbonatos. Se encuentran por debajo de los recubrimientos no consolidados. Se consideran suelos consolidados en tránsito a roca. Este suelo es apto para el hincado de pilotes.
- **Recubrimientos no consolidados:** Abarca las unidades geotécnicas Cuaternario Eluvial (QHe) y Cuaternario Aluvial (PLHa). Compuesto por suelos no consolidados que presentan un escaso espesor y se hallan tapizando el sustrato competente. Presentan baja capacidad portante, por tano no son aptos para el hincado de pilotes.

Tabla 1. Parámetros geotécnicos.

U.G.	prof. sup.	prof. inf.	SUCS	W	γ media	Qd media	Qc media	ϕ' media	c' media	σ' media	E media
QHe	0,0	0,2-0,6	SM	< 1	18,0	6,0	5,1	30,0	9,8	88	12,8
PLHa	0,0	0,2-0,6	SM	< 1	18,0	5,0	4,3	29,0	6,9	73	10,6
Pq	0,1-0,6	1,6	SM	< 1	19,5	13,0	11,1	34,0	39,4	193	27,6
MPa	0,5	1,6-3,0	SM SW GW	< 1	18,0	16,0	13,6	35,0	56,5	237	34,0
Mmeb	1,6	3,0	SM SW	< 1	18,0	20,0	17,0	37,0	82,5	297	42,5
Und	m	m		%	kN/m ³			°	kPa	kPa	Mpa

2.4. Estimación de áreas aptas para hincar

Con los parámetros obtenidos en los ensayos y sondeos se elaboraron varios perfiles geológicos-geotécnicos en ambos sentidos (E-W y N-S) mediante la correlación de los parámetros del suelo con las unidades geotécnicas. En la Figura 2 podemos observar uno de los perfiles del suelo estratificado obtenido a partir de la identificación de los parámetros geotécnicos.

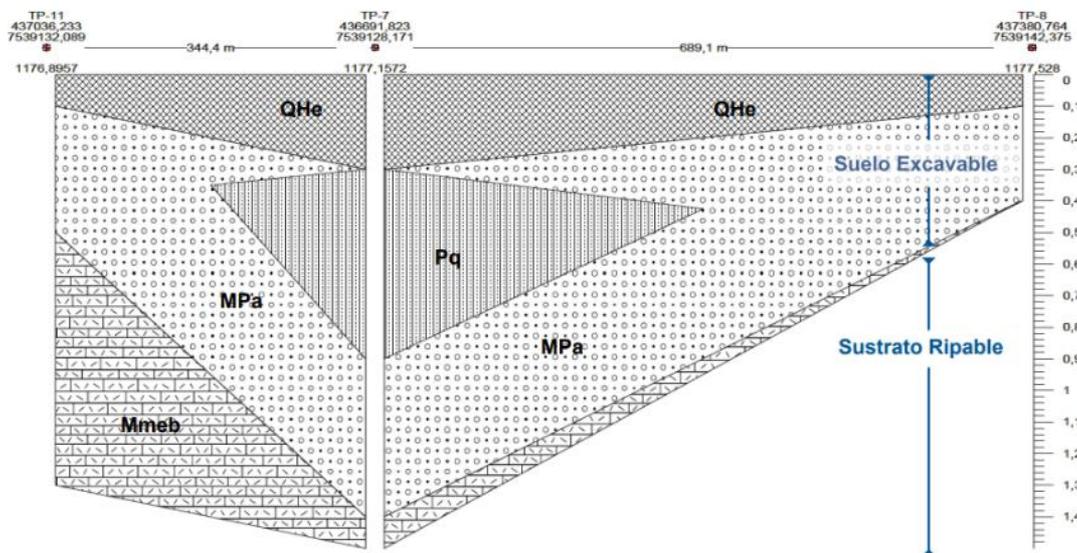


Figura 2. Perfil geológico geotécnico E-W.

Con los perfiles geotécnicos se efectuó una interpolación y se obtuvo un mapa de calor en función al espesor de los suelos estimados. Como se observa en la Figura 3 la zona de color verde que abarca más del 48% del área, presenta estratos consolidados con espesor mayor a 1,00 m y es presumiblemente apto para el hincado de pilotes. En la segunda etapa del estudio, se corroborará los suelos aptos cuando se realice la campaña de hincado de pilotes y pruebas de carga.

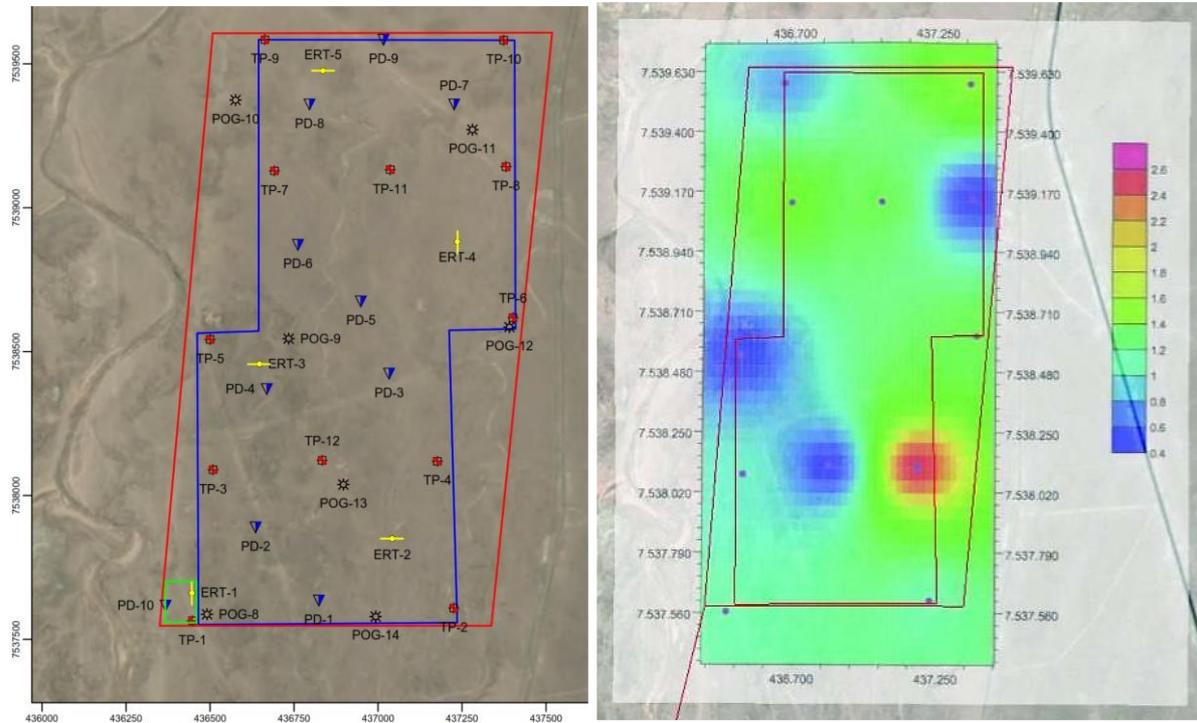


Figura 3. Ubicación de puntos de investigación (izquierda) y mapa de calor de espesor de estratos consolidados (derecha).

3. APLICACIÓN DE PRUEBAS DE EXTRACCIÓN

3.1. Pilotes metálicos

Los pilotes son perfiles metálicos de acero A572, grado 50, fluencia 50 ksi, longitud 3,708 m; diseñados aplicando la norma ANSI/AISC 360-10 (LRFD) (Instituto Americano de Construcción en Acero, 2010). En función a la posición dentro de la estructura metálica se plantea el uso de perfiles W8x13, W8x15 y W8x21. Por cuestiones académicas se analizará únicamente el perfil W8x13, tal como se muestra en la Figura 4. Dentro del área de estudio se hincaron una muestra representativa de 21 pilotes, repartidos en una extensión de 100 Has. Cada pilote representa un área aproximada que oscila de 3 a 5 Has.

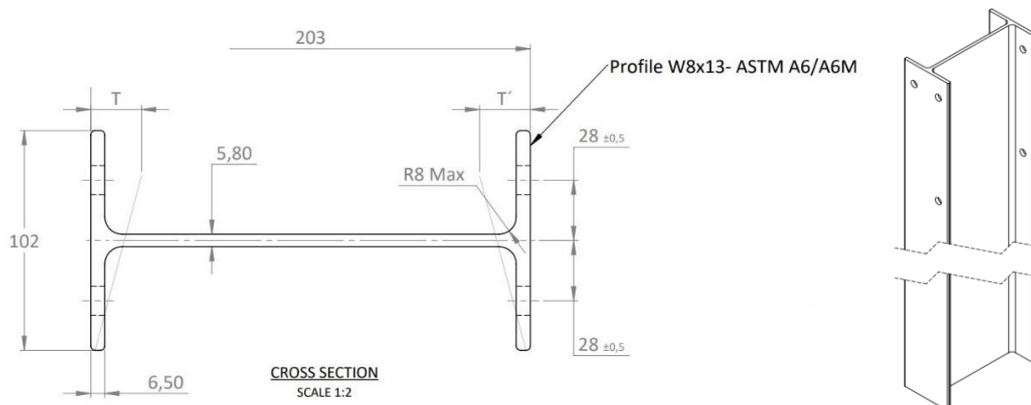


Figura 4. Pilar metálico W8x13, ASTM A6/A6M (longitud en mm)

3.2. Cargas de diseño

En la Tabla 2 se muestran las cargas últimas de diseño y de prueba máxima, ésta última permitirá determinar la capacidad estática de las “hincas”. Las cargas de diseño y los factores de seguridad se determinaron con normativa europea bajo el criterio de estado límite último (ULS). Para la combinación de cargas se aplicó la norma NCh3171:2010 sección 9.1 diseño por resistencia (Norma Chilena Oficial, 2010). Se consideró cargas permanentes (D) y carga de viento (W). Se descartó las cargas de nieve (S) porque el proyecto se encuentra en una zona desértica.

Los estados límites de cimentaciones profundas pueden ser relativos al terreno y al propio pilote, siendo los principales modos de fallo por estabilidad global, hundimiento, arranque y rotura transversal del terreno (Sánchez-Carratalá, 2012).

Tabla 2. Carga última de prueba.

Tipo de carga	Und	Combinación de carga	Carga de diseño	F.S.	Carga de diseño última	Carga de prueba máxima
Horizontal	kN	1,3 W + 1,2 SW + 0,5 S	13,00	1,5	19,50	19,50
Axial (compresión)	kN	1,3 W + 1,2 SW + 0,5 S	21,00	1,6	33,60	33,60
Axial (tracción)	kN	1,3 W + 0,9 SW	-1,40	1,6	-6,72 ¹	-23,52 ²
Flexión	kN-m		28,00			

3.3. Metodología propuesta para pruebas de extracción (Pull Out Test)

Las pruebas de extracción consisten en la aplicación de carga horizontal y cargas verticales (tracción y/o compresión). Los 21 pilotes hincados fue sometidos a esta prueba. El criterio de aceptación se basa en obtener un desplazamiento no mayor a 0,0254 m (1”). Efectuar ensayos de carga permite comprobar la resistencia por punta y fuste y verificar el asentamiento obtenido en el cálculo de cimentaciones profundas basado en principios teóricos (Barreto, 2011). A continuación, se expone la metodología de cada prueba:

3.3.1. Prueba de carga horizontal

Esta prueba consiste en aplicar cargas horizontales sobre la cabeza de la “hinca” ubicado a 2,00 m del nivel del suelo (Ver Figura 5). Se empieza aplicando el 60% de la carga de prueba con incrementos del 20% de carga hasta el 100% de la carga máxima. Antes de cada incremento de carga se debe realizar una pausa de 10 segundos para estabilizar el desplazamiento. Una ventaja de esta prueba es que permite conocer la interacción suelo-estructura bajo solicitaciones horizontales. El desplazamiento máximo horizontal debe ser medido a nivel del suelo y el desplazamiento residual, al culminar el ensayo, no debe ser mayor a 0,01 m.

3.3.2. Prueba de carga vertical en tracción (extracción)

Esta prueba se debe realizar después de concluir la prueba de carga horizontal. Las cargas verticales, de extracción o arrancamiento, se aplican con incrementos del 20% hasta alcanzar la carga máxima de tracción (Ver Figura 5). Si no se supera el desplazamiento máximo al 20% de la carga se considerará satisfactoria. Si no se supera el desplazamiento máximo al 100% de la carga no se requerirá realizar la prueba en compresión. Antes de cada incremento de carga se debe realizar una pausa mínima de 1 minuto o hasta que el desplazamiento medido en el dial de prueba se estabilice.

¹ La carga última de diseño en tracción es ínfima. La prueba de carga en tracción será válida si supera el 20% de la carga de prueba en compresión.

² La prueba de carga en tracción se realizará hasta el 70% de la carga de prueba en compresión. Basado en el código CTE, la resistencia del fuste en tracción es el 70% de la resistencia obtenida bajo cargas en compresión.

3.3.3. Prueba de carga vertical en compresión

Esta prueba sólo se realiza cuando la prueba de tracción no ha alcanzado su carga máxima. En este escenario, las cargas verticales de compresión, se aplican con incrementos del 20% hasta alcanzar la carga máxima. Si no se alcanza el desplazamiento máximo al 100% de carga se considerará una prueba satisfactoria. Antes de cada incremento de carga se debe realizar una pausa mínima de 1 minuto.



Figura 5. Ejecución de pruebas de carga horizontal (izquierda) y vertical (derecha)

3.4. Análisis de las pruebas de carga

En función a los resultados obtenidos en la muestra representativa de 21 pilotes repartidos en más de 100 Has.; podemos afirmar que la metodología propuesta es satisfactoria. Como se observa en la Figura 6, el pilote P20 falló en la prueba de carga horizontal, al registrar un desplazamiento superior al permitido. La carga aplicada fue de 19,7 kN produciendo un momento flector de 59,1 kN-m en todos los casos excepto en el pilote P20 donde la carga fue de 15,8 kN y un momento flector de 47,4 kN-m.

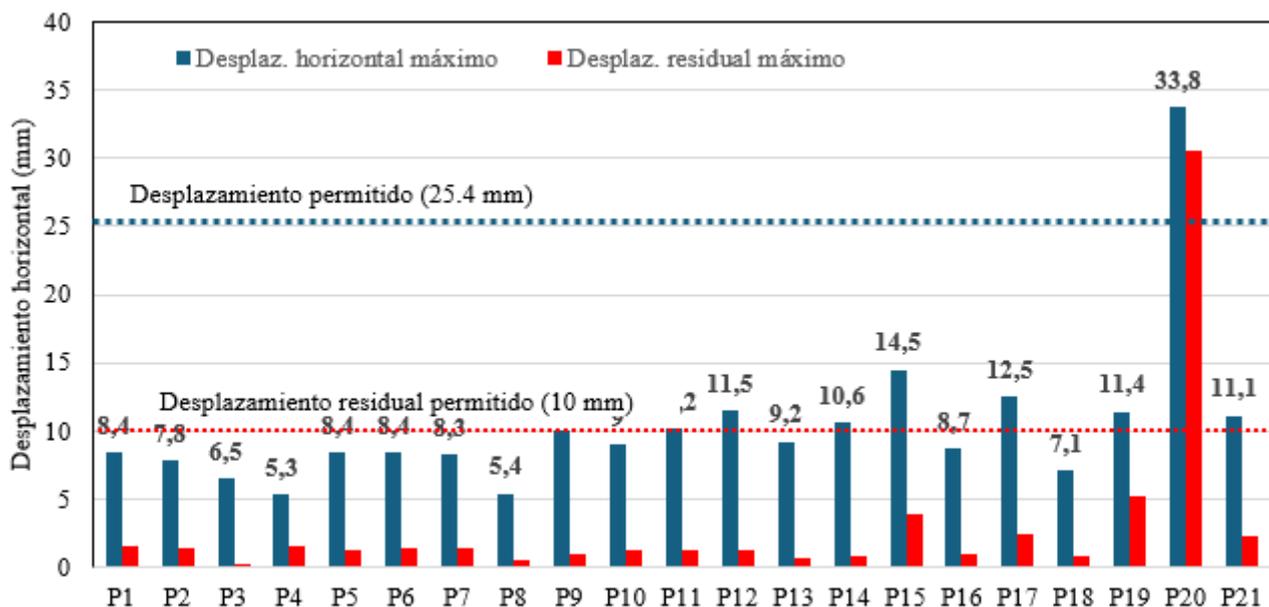


Figura 6. Resultados de la prueba de carga horizontal.

El pilote P20 representa un área de estudio de 35.000 m². Para descartar el área no apta, se realizó un nuevo muestreo, para ello se hincaron 6 pilotes alrededor del pilote fallido. Los resultados de las pruebas de carga resultaron satisfactorios. De esta manera se prescindió de un área menor. La información concerniente al nuevo muestro no forma parte de este trabajo.

En los ensayos de carga vertical todas las pruebas resultaron satisfactorias. Las cargas aplicadas fueron de 23,8 kN para ensayos de tracción y 34 kN para ensayos de compresión. Como se observa en la Figura 7, los desplazamientos obtenidos son ínfimos, esto nos da idea que la resistencia por fricción en el fuste del pilote es suficientemente alta para soportar las solicitaciones de compresión.

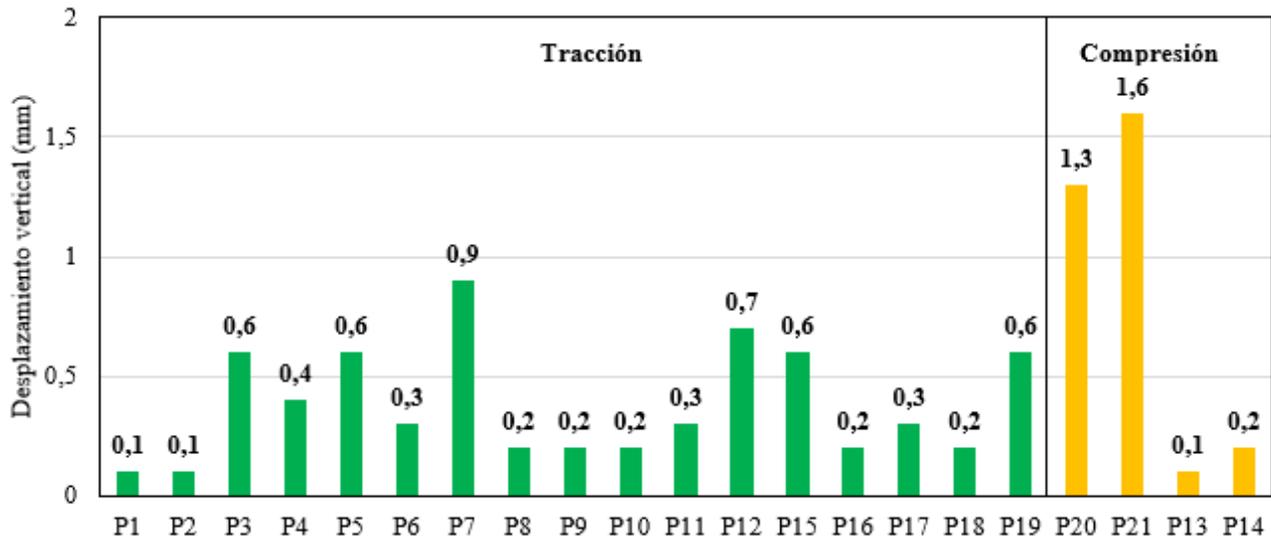


Figura 7. Resultados de la prueba de carga vertical

3.5. Evaluación de la confiabilidad

Existe un mayor nivel de confiabilidad en la capacidad de carga de los pilotes cuando se comprueba que la probabilidad de falla es mínima (Quispe, 2019). En base a los resultados obtenidos, aplicando las cargas máximas de prueba se registraron desplazamientos ínfimos en 41 de las 42 pruebas realizadas, lo cual nos brinda una confiabilidad mayor a 97%.

Este nivel de confiabilidad se vio reflejado durante el proceso constructivo. En más de un centenar de pruebas realizadas para validar el proceso constructivo se obtuvieron resultados óptimos, esto nos permite asegurar que los pilotes instalados serán capaces de soportar los esfuerzos últimos de diseño.

4. PROCESO CONSTRUCTIVO

Para el hincado de pilotes, durante el proceso constructivo de la planta, se dividió la zona apta para hincado en 15 sectores. Se hincaron 10.311 pilotes en un periodo de 4 meses. En ningún caso fue necesario realizar pre-perforación ni se optó por cimentación convencional (Ver Figura 8). Para validar la competencia de los pilotes hincados se efectuaron pruebas de carga aleatorias obteniendo resultados satisfactorios.



Figura 8. Proceso constructivo del hincado de pilotes y armado de estructuras

5. CONCLUSIONES

- La investigación geotécnica para proyectos solares, que ocupan grandes extensiones de suelo, esta orientada a identificar suelo superficial con resistencia media-alta, apta para el hincado directo de pilotes hasta una profundidad mínima de 2 m. En el estudio se logró identificar un 48% de la superficie de suelo potencialmente disponible para hincado, mediante un mapa de calor (resistencia versus espesor superficial) obtenido por la correlación de las propiedades geológicas y geotécnicas del suelo.
- La aplicación de pruebas de extracción (Pull Out Test) permitió medir la capacidad de carga de 21 pilotes de prueba, la prueba de carga horizontal o lateral fue la más influyente. Según los resultados se corroboró que el 46% de la superficie de suelo es apta para el hincado, excepto una zona de 35.000 m² (1,75%) que posteriormente fue reevaluada.
- Durante la ejecución del proyecto se logró hincar 10.311 pilotes en la superficie de suelo previamente identificada (46%) con resultados satisfactorios, sin necesidad de optar por perforación previa o cimentación convencional. Esto demuestra que la aplicación de la metodología basada en pruebas de extracción es útil para identificar suelo competente y para comprobar que los pilotes hincados tienen la capacidad para soportar los esfuerzos últimos de diseño, con un alto nivel de confiabilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM internacional. (2010). ASTM D3689-07: *Métodos de ensayo normalizados para cimentaciones profundas sometidas a carga estática de tensión axial.*
- ASTM Internacional. (2010). ASTM D3966-07: *Métodos de ensayo normalizados para cimentaciones profundas sometidas a cargas laterales.*
- Barreto, A. P. (2011). *Evaluación comparativa de la capacidad de carga en cimentaciones profundas. Fórmulas analíticas y ensayos de carga.* Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, 246 p.
- Instituto Americano de Construcción en Acero. (2010). ANSI/AISC 360-10: *Especificaciones para construcciones de acero estructural.*
- Norma Chilena Oficial. (2010). NCh 3171.Of2010: *Diseño estructural – Disposiciones generales y combinaciones de cargas.*
- Quspe, S. U. (2019). *Análisis de confiabilidad de la capacidad de carga de pilotes hincados.* Tesis de Maestría. Unidad de Posgrado, Universidad Nacional de Ingeniería, 152 p.
- Sánchez-Carratalá, C. R. (11-13 de Julio de 2012). *Bases para el proyecto de cimentaciones de pilotes hincados para estructuras de apoyo de placas en parques solares fotovoltaicos.* XVI congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. Valencia, España.