



Trabajos de Pilotaje Proyecto de Modernización de la Refinería de Talara, Perú

La filial del Grupo Terratest en Perú Cimentaciones Prefabricadas Terratest Perú S.A.C. ha sido contratada por Técnicas Reunidas Talara, S.A.C. para llevar a cabo las obras de cimentación del Proyecto de Modernización de la Refinería de Talara, Perú, de la compañía estatal Petroperú.

Javier Moreno Sánchez, director de Desarrollo de Proyectos de Terrales S.A.

El Proyecto de Modernización de la Refinería de Talara (PMRT) está siendo llevado a cabo por la filial peruana de Técnicas Reunidas, para la compañía estatal peruana Petróleos del Perú (Petroperú) dedicada al transporte, refino distribución y comercialización de combustibles y otros productos derivados del petróleo. La ampliación y modernización de la Refinería de Talara es el proyecto energético más grandes que se está desarrollando, en estos momentos, en Perú; tiene como objeto la producción de combustibles más limpios que aseguren la preservación del medio ambiente y por ende de la salud de los ciudadanos, con un contenido máximo en azufre de 20 partes por millón.

La filial del Grupo Terratest en Perú, Cimentaciones Prefabricadas Terratest Perú S.A.C., ha ejecutado con éxito un Contrato de 117 Millones de Soles para la cimentación, mediante pilotes prefabricados, del PMRT. El Contrato ha contemplado, en una primera fase, la prefabricación y la hinca de más de 125 mil metros lineales de pilotes de hormigón armado definitivos y más de 5,7 mil metros de pilotes de prueba, con profundidades comprendidas entre los 10 y los 23 m. Asimismo se ha efectuado el descabezado de más de 8.000 pilotes, con mordaza hidráulica.

Para la pre-fabricación de los pilotes, Cimentaciones Prefabricadas Terratest Perú S.A.C., ha construido una factoría de pilotes prefabricados en Piura, con una capacidad de prefabricación diaria, de hasta 800 metros lineales (ampliable), con la



Fabricación de pilotes.



más moderna tecnología, y dotada de un laboratorio externo que ha permitido llevar un control sistemático e inmediato de la calidad del pilote prefabricado. El plazo de ejecución de las obras de cimentación ha sido de 13 meses, para lo que se han puesto a disposición 4 equipos de hinca, montados sobre una grúa Caterpillar de 60 t, dotados de un martillo Junttan de 9 t.

Dado que el área se encuentra clasificada con un índice de sismicidad de 0,4 g, para confirmar la profundidad de diseño de la cimentación y comprobar las cargas a las que van a estar sometidos los pilotes, frente al hundimiento, y la interacción pilote-terreno, se van a realizar 35 pruebas estáticas de compresión vertical, 33 pruebas estáticas de tracción vertical y otras 33 pruebas de empuje lateral de acuerdo a los parámetros de diseño de la cimentación.

Asimismo, durante la hinca de los pilotes se ha mantenido un control y seguimiento del rechazo de la hinca, para comprobar que se ha alcanzado la capacidad de carga que debe soportar el pilote, además de llevar a cabo hasta 269 pruebas dinámicas de carga con el analizador de pilotes PDA- (Pile Driving Analyzer), que facilita, de forma rápida y no destructiva, las condiciones de la hinca y la interacción suelo-terreno, controlando la integridad del pilote y su capacidad de carga diferenciada entre fuste y punta. Uno de los retos de la obra ha sido adaptar las especificaciones y fabricación de los pilotes a la normativa de aplicación peruana, entre otras:

- Norma Técnica de Edificación E.060.
- Norma de Suelos y Cimentaciones E.050.
- Norma de Diseño Sismorresistente E.030.
- Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-11).
- Guide to design, Manufacture, and Installation to Concrete Piles (ACI 543R-12).

En España los pilotes se fabrican bajo un sistema de Calidad UNE-EN-ISO 9001-2000 Certificado por AENOR, según la UNE-EN 12794+A1, en longitudes de 5 a 12 m, con incrementos de metro en metro. Para longitudes mayores, se emplea la junta de unión tipo ABB, patentada y experimentada, que garantiza la continuidad de las características resistentes del pilote y que cuenta con la máxima clasificación según la norma UNE-EN 12794+A1 (Clase A). En cumplimiento de la normativa de aplicación en Perú, se han fabricado los pilotes con cemento Portland tipo V (ASTM C 150) o cemento hidráulico tipo MS (ASTM C 1157), según sea la agresividad del terreno. Con un hormigón de resistencia característica a 28 días no menor de 45MPa ($f'c = 45$ MPa según ACI 318).



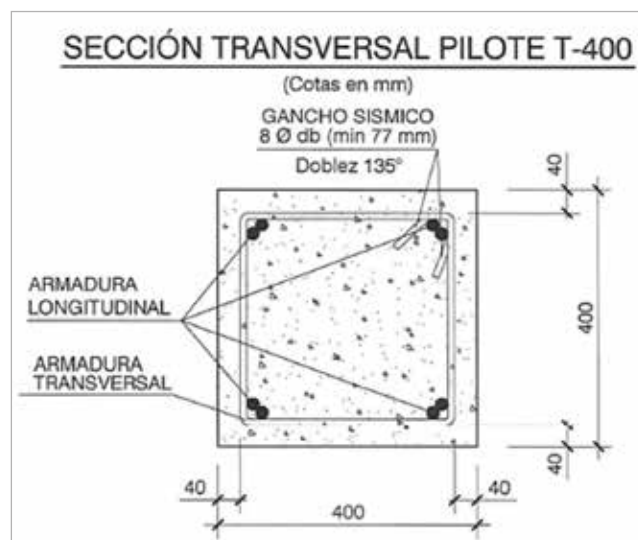
Operarios trabajando.

Armadura Longitudinal

Se han diseñado dos tipos de armado longitudinal, según los esfuerzos en los pilotes de sección 400x400mm. La armadura longitudinal se dispone en toda su longitud mediante barras de acero corrugado de grado 60, de límite elástico 60.000 psi (420 MPa), (ASTM A-706 y/o ASTM A-615) de la siguiente forma:

Sección del pilote (mm)	Nº de barras	Calibre de las barras	Denominación de pilote
400	8	6/8"	T-400 estándar
400	8	1"	T-400 reforzado

La dimensión del pilote ha permitido situar los redondos en cada esquina, según se puede ver en el siguiente esquema:



Armadura Transversal

Los pilotes cuentan, también a lo largo de toda su longitud, con armadura transversal en forma de cercos con acero de grado 60, de 3/8" para los dos tipos de secciones, estándar y reforzada. Según el artículo 21.5.3.2 las barras de los estribos deben ser como mínimo de 3/8" para barras longitudinales de hasta 1". Según artículo 21.12.4.4, los pilotes deberán tener un refuerzo transversal en cinco veces la dimensión transversal del elemento, en este caso, para pilotes de lado 400 mm será de 2 metros. Dada la peculiar puesta en obra de los pilotes prefabricados, con variaciones potenciales de la profundidad a la que llega la punta de los pilotes, para garantizar los dos metros de refuerzo por debajo de la cara inferior del encepado, se fabrica todo el tramo superior con armado según el artículo 21.12.4 y 21.6.4.1 de la N.T.E. E.60 Concreto Armado.

$$A_{sh} = 0,09 \frac{s bc f^c}{fyh} = 269,448 \text{ mm}^2$$



Talara (Perú).

Debido a que la cuantía de refuerzo transversal resultante es elevada, y para poder tener separación suficiente entre los cercos para el correcto vibrado del hormigón, se disponen de cercos dobles en los tramos superiores de pilotes. De esta forma la separación entre cercos (St) en el tramo superior del pilote, cumpliendo con la separación máxima indicada en el artículo 21.6.4.1 de la N.T.E. E.60 Concreto Armado, es la siguiente:

Sección del pilote (mm)	Separación (St)	Calibre de las barras del acero	Denominación de pilote
400	9,0 cm	2 # 3/8"	T-400 estándar
400	9,0 cm	2 # 3/8"	T-400 reforzado

La separación entre cercos (St) en el tramo inferior de pilote, cumpliendo con separación máxima indicada en los artículos 7.10, 11.5.5 y 21.4.5.4 de la N.T.E. E.60 y la cuantía mínima del artículo 11.5.6, es la siguiente:

Sección del pilote (mm)	Separación (St)	Calibre de las barras del acero	Denominación de pilote
400	10,0 cm	1 # 3/8"	T-400 estándar
400	10,0 cm	1 # 3/8"	T-400 reforzado

Como se puede ver en el esquema de la sección del pilote, se dispone de gancho sísmico según artículo 21.1.

$$8 \times 3/8" = 76,2 \text{ mm}$$

El recubrimiento nominal entre el paramento y la armadura es de 40 mm. El margen de recubrimiento es de 5 mm. Con este diseño, se pudo comprobar su capacidad para absorber los esfuerzos de compresión, tracción, flexo-compresión, flexo-tracción y cortante, hasta los límites que a continuación se detallan.



Pilotes prefabricados.

Capacidad frente a Compresión Centrada (tope estructural)

La ACI 543R-12, en su tabla 4.3.3, fija la capacidad de carga en servicio frente a compresión centrada (sin flexión) o tope estructural como:

$$Q_{TOPE} = 0,33 \cdot f^c \cdot A_c + 0,39 fy \cdot A_{st}$$

donde:

A_c = área de la sección transversal de hormigón

f^c = resistencia característica del hormigón

fy = resistencia característica del acero

A_{st} = área total de las armaduras longitudinales

Dado que la armadura longitudinal es variable entre distintos pilotes siendo sólo constante A_c , y teniendo en cuenta que este tope sólo se puede agotar estructuralmente cuando los pilotes no se ven sometidos a flexión (circunstancia que no se da habitualmente), despreciando del lado de la seguridad la contribución del acero en compresión, se tiene:

$$T-400: Q_{TOPE} = 0,33 \cdot 45 \text{ MPa} \cdot 163,210 \text{ mm}^2 = 2.424 \text{ kN} = 242,4 \text{ t}$$

No obstante, la carga axial máxima admisible por los pilotes estará condicionada por la verificación del estado límite último de solicitaciones normales (flexo-compresión).

Carga de hundimiento (rechazo admisible)

La máxima carga a la que puede ser sometido el pilote viene limitada no solo por su capacidad estructural, dada en el apartado anterior, sino también por el comportamiento del terreno que recibe las solicitaciones que le transmite el propio pilote. La carga a la que se produce el agotamiento del terreno, y que produce la rotura del mismo, se denomina carga de hundimiento del pilote. A esta carga se le impone una limitación, aplicándola un coeficiente de seguridad. En los pilotes prefabricados, dada su particular puesta en obra, supone un ensayo de carga sobre cada uno de ellos y permite obtener su carga admisible aplicando fórmulas de hinca. Entre las muchas existentes es habitual el empleo de "la holandesa", contrastada como conservadora por Terratest para energías de golpeo del orden de 1-2 t•m con innumerables ensayos estáticos y dinámicos de carga, cuyo desarrollo es el siguiente:

$$Q_{adm} = \frac{M^2 \cdot H}{F \cdot e \cdot (P + M)}$$

siendo:

Q_{adm} =carga admisible.

M = peso de la maza del equipo de hinca (9 Toneladas).

H = altura de caída de la maza durante el control del rechazo (30 cm para equipos de hinca hidráulicos).

F = coeficiente de fórmula (7 para equipos de hinca hidráulicos).

Este coeficiente incluye el coeficiente de seguridad frente a la carga dinámica de hundimiento.

e = rechazo (penetración por un golpe).

P =peso del pilote en proceso de hinca.

Aplicando la fórmula para las cargas actuantes puede despejarse el valor del rechazo admisible "e" a medir en obra, de modo que las curvas de hinca se convierten en una relación entre la longitud de pilote hincada y dicho rechazo máximo. Con objeto de facilitar su lectura y obtener valores medios, este parámetro "e" se mide en una serie de diez golpes. Como complemento al control del rechazo en cada pilote, se llevaron a cabo de forma estadística los ensayos dinámicos de carga, con el Analizador de Hinca de Pilotes (A.H.P.), cuyos resultados son correlacionables con los ensayos estáticos de carga.

Por tanto, cuando en el diseño de una cimentación profunda sólo se cuenta con cálculos analíticos de capacidad de carga,



Talara (Perú).

basados en las formulaciones habituales aplicadas a los ensayos geotécnicos de campo o laboratorio, por la elevada incertidumbre a ellos asociada, se requieren factores de seguridad globales altos, del orden de 3. No obstante, cuando se prescriben ensayos de carga, e incluso se cuenta con ellos antes del comienzo de los trabajos, mantener un factor de seguridad del orden de 3 supone un sobredimensionamiento no justificado, siendo más adecuados coeficientes de seguridad global del orden de 2 para situaciones persistentes y de 1,5 en sismo.

Este planteamiento ha sido compatible con el apartado 5.4.4 del reglamento REP-04 Factores de Seguridad: "Los valores de capacidad de soporte última [...] deberán ser divididos por un factor de seguridad entre 2 y 3, dependiendo del criterio del Profesional Idóneo encargado, para obtener la capacidad de soporte admisible de diseño". En este caso, el coeficiente de seguridad frente a hundimiento en ningún caso deberá resultar inferior a 2. Las soluciones de cimentación con pilotes prefabricados, los cuales son en sí mismos una prueba de carga y sobre los que se puede realizar un control de ejecución muy exhaustivo, incluyendo ensayos dinámicos, gozan de la máxima garantía precisamente por el elevado control al que se las puede someter.

En general, el control de validación se vincula al control del rechazo y a la realización de ensayos dinámicos de carga, y con este procedimiento no debe establecerse a priori de forma cerrada la longitud de los pilotes ya que es la propia ejecución, con el control del rechazo y la eventual realización de ensayos, la que determina la longitud definitiva de cada pilote. Por tanto, para la definición de la longitud de hinca de los pilotes, sobre una muestra representativa de los mismos, se ha llevado a cabo como control sistemático de la cimentación, como medio adicional de estimación y comprobación de cargas de hundimiento avalado por la práctica internacional. ●

TERRATEST, S.A.

C/ Juan de Arespacochaga y Felipe, 12

28037 Madrid.

Tel: 914 237 500

www.terratest.com