

Original

Cimentaciones del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz

Foundations of the 'Constitución de 1812' Bridge over the Cadiz Bay

Alberto Fernández Eusebio^a y Manuel Pita Olalla^{b,*}

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, GINPROSA, Las Rozas, Madrid, España

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Dragados, Madrid, España

Recibido el 26 de octubre de 2015; aceptado el 28 de diciembre de 2015

Disponible en Internet el 29 de marzo de 2016

Resumen

En este artículo se hace un breve resumen de las principales características del terreno donde se apoyan las cimentaciones del puente y de la campaña de prospecciones geotécnicas que fue necesario realizar. También se describe el tipo de cimentaciones empleado y algunos de los medios auxiliares utilizados para la realización de los pilotes y encepados.

© 2016 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

Palabras clave: Sondeo; Ostionera; Plioceno; Pilote; Encepado; Tablestaca

Abstract

This paper includes a brief summary of the main geotechnical features of foundation's ground and of the geotechnical surveys that were performed to define them. It also includes a description of the main characteristics of the pile foundations and some of the ancillary means used during the construction of piles and pile caps.

© 2016 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Keywords: Borehole; Ostionera; Pliocene; Bored pile/Drilled shaft; Pile cap; Sheet pile wall.

1. Introducción

Las cimentaciones del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz son profundas y realizadas mediante encepados de pilotes. El puente apoya en un total de 433 pilotes, de los cuales 277 son de 2 m de diámetro (del estribo 1 a la pila 25), 144 de 1,25 m de diámetro (pilas 26 a 37, con encepado doble) y 12 de 1 m de diámetro (estribo 2). De estos pilotes, 106 se hicieron en el mar desde pontona (pilas 3 a 12) y el resto desde tierra. En la [tabla 1](#) se muestran las dimensiones de los encepados y el número de pilotes de cada uno.

2. Campaña geotécnica

Para el conocimiento de las características geotécnicas del terreno se realizó, ya desde la fase de proyecto, una extensa campaña de prospecciones y ensayos geotécnicos ([fig. 1](#)).

En su primera fase la campaña se centró en realizar 37 sondeos a rotación con recuperación continua de testigo distribuidos uno en cada pila o apoyo del puente, con la excepción de los pilonos principales, donde hicieron 2 sondeos. De estos sondeos, 15 se hicieron en el mar, mediante plataformas flotantes, y el resto en tierra. La profundidad máxima investigada fue de unos 50 m.

En estos sondeos se realizaron 50 ensayos presiométricos y 311 SPT, y se tomaron 353 muestras inalteradas y 62 alteradas. Sobre estas muestras se realizaron del orden de 300 ensayos de identificación de materiales (humedad, densidad, granulometría

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: mpitao@dragados.com (M. Pita Olalla).

Tabla 1
Dimensiones y número de pilotes por encepado

Apoyo	Dimensiones encepado (m)	N.º de pilotes	Diámetro pilotes (m)	Apoyo	Dimensiones encepado (m)	N.º de pilotes	Diámetro pilotes (m)
Estribo 1	39 × 9,4 × 2,4	8	2,00	Pilas 14 a 17	15 × 15 × 5,0	9	2,00
Pilas 2 a 4	13,5 × 9,5 × 4,0	5	2,00	Pilas 18 y 19	20 × 14,5 × 4,0	10	2,00
Pilas 5 a 7	15 × 9,5 × 4,5	6	2,00	Pilas 20 a 24	20 × 11 × 4,0	8	2,00
Pilas 8 y 9	15 × 15 × 5,0	7	2,00	Pila 25	20 × 8,5 × 4,0	6	2,00
Pilas 10 y 11	15 × 15 × 5,0	8	2,00	Pilas 26 a 37	2 × (9,5 × 5,5 × 2,25)	2 × 6	1,25
Pila 12	46 × 34 × 8,5	48	2,00				
Pila 13	46 × 40 × 9,0	56	2,00	Estribo 2	35,9 × 4,7 × 1,75	12	1,00

y límites de Atterberg), 198 cortes directos tipo CD sobre muestras inalteradas, 12 triaxiales, 20 ensayos edométricos y 10 de permeabilidad.

La campaña anterior se complementó posteriormente mediante la realización de sondeos adicionales, penetraciones dinámicas y penetraciones estáticas tipo CPTU. Estas últimas se realizaron sobre todo en los rellenos de aproximación a los estribos del puente, donde hubo que construir terraplenes y muros de suelo reforzado de hasta 12 m de altura sobre importantes espesores de rellenos hidráulicos de escasa competencia geotécnica y potencialmente licuefactables.

3. Caracterización geotécnica del terreno

El perfil geotécnico del terreno se caracteriza por la presencia continua de un sustrato plioceno competente, denominado *facies ostionera*, en el que se apoyan todas las cimentaciones del puente. La *facies ostionera* está constituida fundamentalmente por niveles de arena con pocos finos (indicios a algo), medianamente densa a muy densa (fig. 2), con ocasionales

niveles de grava y de conglomerados, areniscas o calcarenitas con abundantes restos de conchas, conocidos localmente como «roca ostionera». A techo de esta formación, en el contacto Plioceno-Holoceno, aparece ocasionalmente un nivel de arcilla dura, a veces muy firme, de color marrón y gris verdoso. También han aparecido niveles arcillosos más profundos, en general con escasa continuidad y pequeño espesor, constituyendo lentejones aislados. Este sustrato aparece siempre cubierto por rellenos de diverso origen.

En el tramo marino del puente (PPKK 0+000 a 1+580) los rellenos son muy recientes y tienen espesores de 1 a 8 m. Están constituidos por la alternancia de capas de limos o arcillas orgánicas muy blandos a blandos y de arenas flojas a medianamente densas de color gris oscuro, con restos de conchas y ocasionales niveles de grava.

En el tramo terrestre del lado Puerto Real (PPKK 1+580 a 3+200), actualmente ocupado por el muelle de la Cabezuela y la zona industrial anexa, los rellenos tienen un espesor mucho mayor, que varía entre 25 y 16 m. Estos rellenos fueron vertidos a principios de los años sesenta con el objeto de ganar terreno

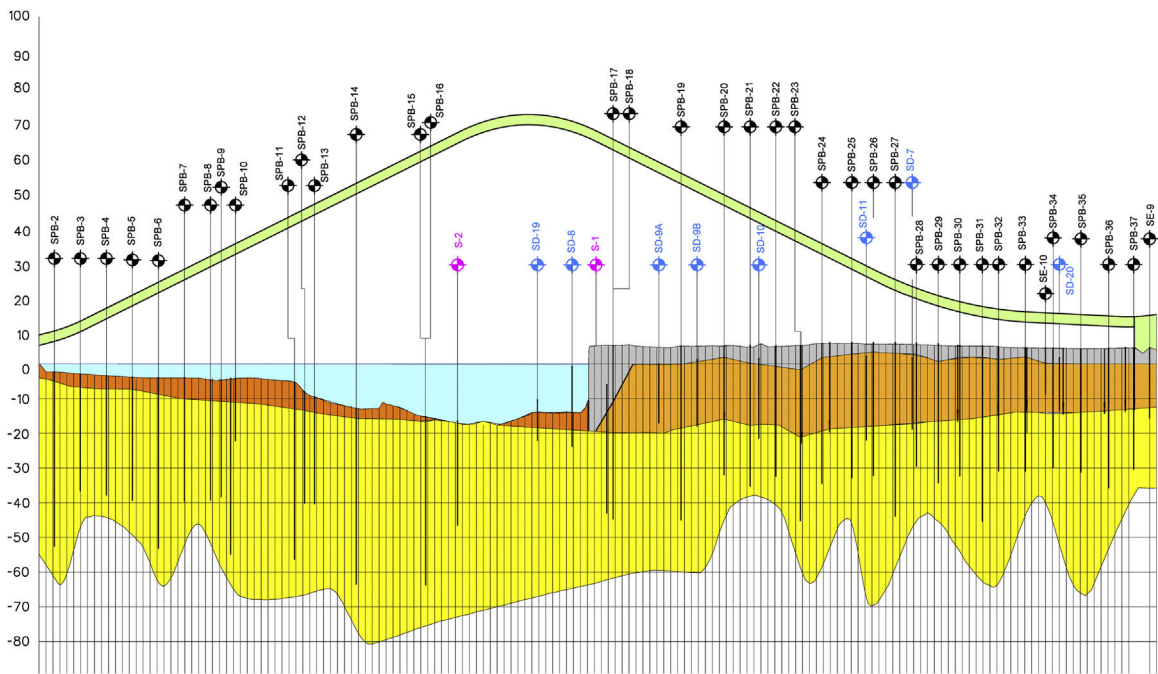


Figura 1. Perfil longitudinal geológico-geotécnico.

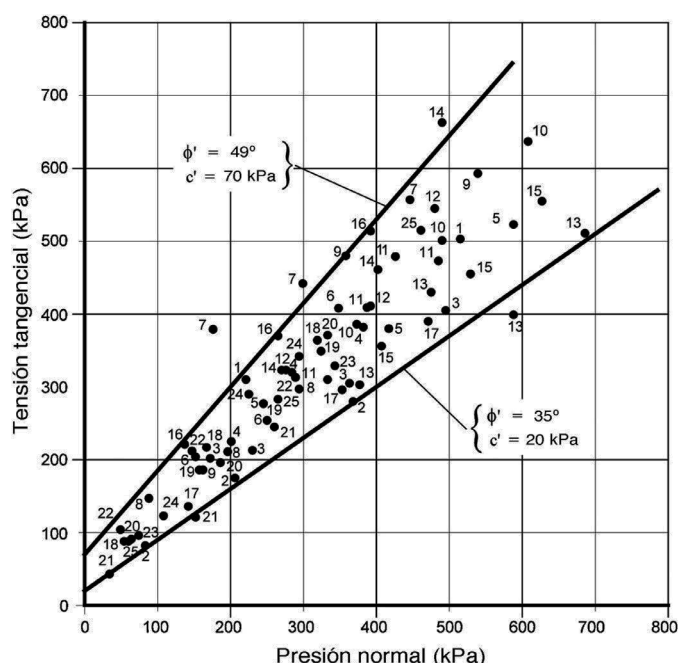


Figura 2. Resultados de ensayos de corte directo en suelos con menos del 30% de finos de la formación Plioceno.

al mar para ubicar la zona portuaria e industrial actual. Dentro de estos materiales se puede diferenciar un tramo inferior de 15 a 20 m de espesor de rellenos hidráulicos y un tramo más superficial de rellenos «no hidráulicos», de 2 a 4 m de espesor, cuya composición y grado de compactación es mucho más heterogénea. Los rellenos hidráulicos están formados por arena fina marrón y gris, floja a medianamente densa, con intercalaciones de limo y arcilla y ocasionalmente restos de conchas.

4. Ejecución de pilotes

Debido a la escasa compacidad de los terrenos superficiales existentes en la zona, todos los apoyos se proyectaron con cimentación profunda mediante pilotes unidos en cabeza con el correspondiente encepado. Estos pilotes trabajan por punta y por fuste empotrados en el sustrato plioceno, con una tensión máxima en cabeza de 6 MPa en servicio [1].

La excavación de los pilotes se realizó por medio de *bucket* o máquinas rotativas con barra «Kelly» equipadas con hélices. Cuando debido a la dureza del terreno no era posible atravesar una capa, se introducía una corona circular con dientes de widia (*carrutieri*).

El sostenimiento de las paredes de la perforación se realizó mediante *lodos poliméricos* de tercera generación.

4.1. Pilotes en tierra

Desde tierra se ejecutaron un total de 327 pilotes, de los cuales 171 son de 2 m de diámetro, 144 de 1,25 m de diámetro (pila 26 a 37) y 12 de 1 m de diámetro (estribo 2). Cincuenta y seis de los pilotes de 2 m de diámetro pertenecen a uno de los 2 pilonos principales del puente (pila 13). El resto de pilotes en tierra corresponden a otros 28 apoyos [2].



Figura 3. Introducción de la armadura y camisa perdida.

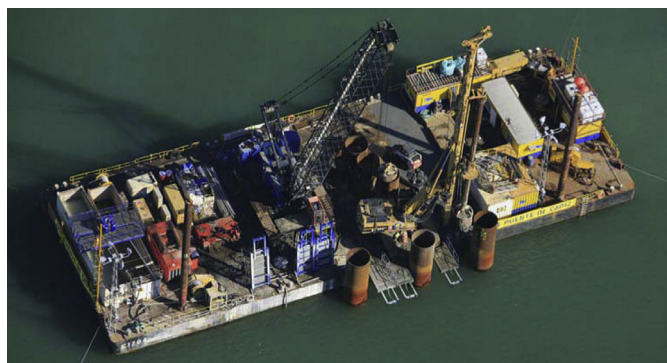


Figura 4. Ejecución de los pilotes desde pontona.

La *longitud* de estos pilotes está comprendida entre 31 y 40 m, con lo que se empotran entre 10 y 13 diámetros en el sustrato plioceno.

Estos pilotes llevaban hasta el sustrato una *entubación perdida* de 5 mm de espesor que se soldaba a la armadura con los correspondientes conectores que garantizaban el recubrimiento mínimo (fig. 3).

Todos los pilotes se equiparon con tubos metálicos unidos a la armadura para realizar *ensayos sónicos* y *sondeos en punta* de todos los pilotes. En el caso de que en la punta existiese material de escasa compacidad, se inyectaba la punta a través de estos tubos.

El *rendimiento* medio en la realización de estos pilotes fue alto, ejecutando cerca de 2 pilotes al día, con un único turno de 15 h al día.

4.2. Pilotes en mar

En total se ejecutaron *desde pontona* (fig. 4) 106 pilotes de 2 m de diámetro, 48 de ellos pertenecientes a uno de los 2 pilonos principales del puente (pila 12). El resto corresponden a los pilotes de los encepados de la pila 3 a la pila 11.

Para la realización de estos pilotes, en una primera fase se introducía con vibrador una *camisa metálica perdida* de 15 mm

de espesor y 2 m de diámetro, para evitar el lavado del hormigón y servir de encofrado en el tramo de agua del pilote. El empotramiento de la camisa perdida en el plioceno (entre 1 y 3 diámetros) se determinó para resistir los esfuerzos del oleaje, de impactos, con el hormigón fresco en el pilote.

La camisa también disponía de conectadores para transmitir a los pilotes los esfuerzos de tracción debidos a la flotación del recinto estanco. Esta camisa perdida se utilizó además como guía, apoyo y conexión a los recintos estancos, que servían para la ejecución en seco de los encepados.

Las *longitudes* de estos pilotes están comprendidas entre 30 y 42 m, con lo que se empotran en el sustrato plioceno 15 diámetros (30 m), y la armadura se introducía en 2 tramos.

Los pilotes se equiparon con 5 tubos metálicos unidos a la armadura para realizar *ensayos sónicos e inyectar la punta* de todos los pilotes. A pesar de las difíciles condiciones de ejecución en mar, tras el análisis de los resultados obtenidos, con los ensayos sónicos de integridad en pilotes en mar no se detectaron anomalías de consideración.

El *rendimiento* medio alcanzado en la ejecución fue de 2 pilotes al día (con 2 turnos al día de 12 h y excluyendo los movimientos de posicionamiento de la pontona).

La ejecución de todos estos pilotes fue llevada a cabo por una UTE Geocisa-Terratest.

5. Ejecución de encepados

5.1. Recintos tablestacados

Para la ejecución de los encepados de las pilas situadas en tierra se ha recurrido a un sistema de contención de tierras mediante *tablestacas hincadas*.

Aproximadamente el 50% de los recintos de tablestacas del puente necesitaron algún sistema de *apuntalamiento* para disminuir las flechas en cabeza y asegurar la estabilidad del recinto.

En el caso de las pilas 1 y 2, al no poderse hincar lo suficiente las tablestacas por la proximidad del sustrato plioceno, fue necesaria la ejecución de 4 pozos de bombeo en el interior del recinto. Con estos pozos de bombeo se buscaba evitar el posible sifonamiento del terreno y minimizar la subpresión sobre el encepado.

En el recinto de la *pila 13* (pila principal del puente situada en tierra), debido a la profundidad de excavación (unos 6 m), la imposibilidad de hacer marcos por el gran tamaño del encepado (46×40 m) y la proximidad de la pantalla de tablestacas traseras del muelle de La Cabezuela (a unos 7 m en planta), fue necesario



Figura 5. Imagen aérea de la excavación para la ejecución del encepado de la pila 13 (pilón principal en muelle de La Cabezuela).

hacer uno de los lados del recinto con una pantalla continua de hormigón armado de 0,8 m de ancho (fig. 5).

En la mayoría de recintos, las tablestacas utilizadas eran de 11 m de longitud, habiéndose utilizado una longitud mínima de tablestaca de 8 m (en las pilas 30 y 31) y una longitud máxima de 24,5 m (en la pila 13).

5.2. Recintos metálicos

Para la ejecución de los encepados de las pilas 3 a 12, al estar ubicados en el mar, fue preciso el uso de recintos estancos para trabajar en seco por debajo del nivel del mar. Dada su singularidad, la explicación de estos recintos se realiza en un artículo propio en este número [3].

Bibliografía

- [1] M. Martín Gómez, H. Bernardo Gutiérrez, J. Cayetano Rodríguez, M. Escamilla García-Galán, V.M. Jiménez Aguadero, F.J. Pérez Gamarra, Ejecución de cimentaciones del Viaducto de la Bahía de Cádiz. IV Congreso Internacional de Estructuras, ACHE. (2008).
- [2] M. Martín Gómez, J. Cayetano Rodríguez, V.M. Jiménez Aguadero, G. Burbano Juana, M. Pita Olalla, Ejecución de las cimentaciones del Nuevo Puente sobre la Bahía de Cádiz, Jornada Técnica sobre Cimentaciones Singulares de Puentes (Marzo 2010).
- [3] J.M. González Barcina, F. Niño Tejedor, H. Bernardo Gutiérrez, V.M. Jiménez Aguadero, Recintos estancos en la cimentación marítima del Puente de la Constitución de 1812, Hormigón y Acero. 67 (2016) 37–42.