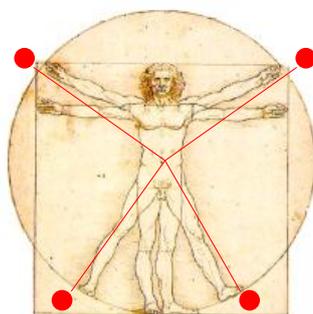


TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

VOLUMEN XIII. AÑO 2015

SEPARATA



APLICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE PILOTES CPI-5 EN LA NUEVA TERMINAL MARÍTIMA DE PASAJEROS DE LA CIUDAD DE CÁDIZ

Gabriel Manuel Escribano Aragón, David Herranz



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
Escuela Politécnica Superior
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: Gabriel Manuel Escribano Aragón, David Herranz;
Abril, 2015.

<http://www.uax.es/publicacion/aplicacion-y-dimensionamiento-de-pilotespci-5-en-la-nueva-terminal-maritima.pdf>

© De la edición: *Revista Tecnol@ y desarrollo*

Escuela Politécnica Superior.

Universidad Alfonso X el Sabio.

28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).

ISSN: 1696-8085

Editor: Javier Morales Pérez – tecnologia@uax.es

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

APLICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE PILOTES CPI-5 EN LA NUEVA TERMINAL MARÍTIMA DE PASAJEROS DE LA CIUDAD DE CÁDIZ

Gabriel Manuel Escribano Aragón^(1, 2), David Herranz⁽³⁾

- (1) Ingeniero Técnico de Obras Públicas especialidades de Construcciones Civiles e Hidrología. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Obras Públicas. Universidad Politécnica de Madrid (UPM).
(2) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Escuela Politécnica Superior. Universidad Alfonso X "El Sabio" (UAX). Tlf.: 902100868, e-mail: gaby_escribano@yahoo.es
(3) Licenciado en Ciencias Físicas. Ingeniería Marítima y Costera. Universidad Alfonso X "El Sabio". e-mail: dahefer@gmail.com

RESUMEN: A la vista del escaso desarrollo de las infraestructuras marítimas relacionadas con el tránsito de viajeros que el puerto de Cádiz tiene, se encuadra la construcción de una nueva Terminal Marítima de Pasajeros mediante cimentación por pilotes CPI-5. De manera sencilla se denomina CPI-5 al conjunto de pilotes perforados y hormigonados in situ, en los cuales el sostenimiento de las paredes de la perforación se realiza mediante entubación perdida. Normamente este tipo de pilote se utiliza de modo que se trabaja por punta apoyado en roca o capas duras de terreno, siempre que se atraviesen capas de tierra no incoherente fino en presencia de agua y en algunos casos con capas de terreno coherente blando, cuando existan capas agresivas al hormigón fresco.

PALABRAS CLAVE: Terminal Marítima; Cimentación; Pilote; CPI-5; Resistencia por punta; Resistencia por fuste; Resistencia al hundimiento; Tope estructural.

ABSTRACT: Due to the lack of maritime infrastructure development related to passengers traffic that Cadiz Port has, is placed de construction of a new Maritime Passenger Terminal with CPI-5 foundation. In a simple way CPI-5 is called the set of bored piles with "on site" concrete, in which the support of the walls of the drilling is done by intubation lost. Usually this type of pile is used as a base resistance pile supported by hard layers of ground or rock, when it penetrates fine incoherent ground layers with water presence and some cases is also used in soft cohesive soil layers when there are some aggressive layers to fresh concrete.

KEY-WORDS: Maritime Terminal; Foundations; Pile; CPI-5; Pile base resistance; Pile shaft resistance; Collapse resistance; Structural resistance.

SUMARIO: 1. Introducción 2. Naturaleza y características del terreno 3. Cimentación mediante pilotes CPI-5 4. Conclusiones 5. Agradecimientos 6. Bibliografía.

1. Introducción

El conjunto de municipios que se articulan alrededor de la bahía de Cádiz está funcionando cada vez más como un modelo metropolitano pero con una clara peculiaridad, su articulación entorno a "la bahía". El puerto de Cádiz adquiere un gran valor, tanto en la realidad metropolitana de la bahía como en el progreso y el funcionamiento de la ciudad dentro de esa realidad, y no puede darle la espalda.



Fig. 1.1 – Bahía de Cádiz con sus principales elementos de unión.

La actual y deficiente relación entre las diversas actividades que se llevan a cabo en el puerto de Cádiz deben tener una respuesta clara, tanto hacia las comunicaciones en la bahía, como a la actividad turística que genera.

El puerto de Cádiz tiene principalmente los siguientes problemas:

- Caótica configuración del puerto, resultado de un crecimiento a espaldas de la ciudad, el cual es gestionado por un distinto estamento.
- No existencia de una estación marítima de pasajeros lo suficientemente grande y moderna como para ser capaz de absorber los tráficos marítimos nacionales e internacionales.
- Escasas instalaciones para el servicio del tráfico marítimo metropolitano, en gran auge en éste momento.
- Gran mezcla de usos portuarios de diferente carácter, que produce que el soporte de infraestructuras relacionado con los tráficos marítimos de pasajeros se encuentre diluido en la maraña de usos del puerto.

Cuando se realizan las excavaciones para la ejecución de una obra en general, pueden existir diversas dificultades para encontrar el firme o estrato resistente donde se quiera cimentar. En este proceso se presenta la necesidad de apoyar una carga aislada sobre un terreno no firme, o difícilmente accesible mediante métodos habituales.

Para solucionar, entre otros, este tipo de problemas y dificultades se usan los pilotes. Se denomina pilote al elemento constructivo de las cimentaciones profundas de tipo puntual utilizado en las obras, que permite una de las siguientes opciones:

- Transmitir las cargas de la superestructura e infraestructura a través de estratos flojos e inconsistentes, hasta estratos más profundos con la capacidad de carga suficiente para soportarlas.
- Repartir las cargas de la superestructura e infraestructura a un suelo relativamente blando de tal manera que atraviesen lo suficiente para que permita soportar la estructura con seguridad.

La profundidad a la cual se decide utilizar una cimentación por pilotes es tal que hace inviable, técnica y económicamente la utilización de una cimentación tradicional de zapatas o losas.

Los pilotes transmiten al terreno las cargas que reciben de la estructura mediante una combinación de rozamiento lateral o resistencia por fuste y resistencia a la penetración o

resistencia por punta. Ambas dependen de las características del pilote y del terreno, y la combinación idónea es el objeto del proyecto.

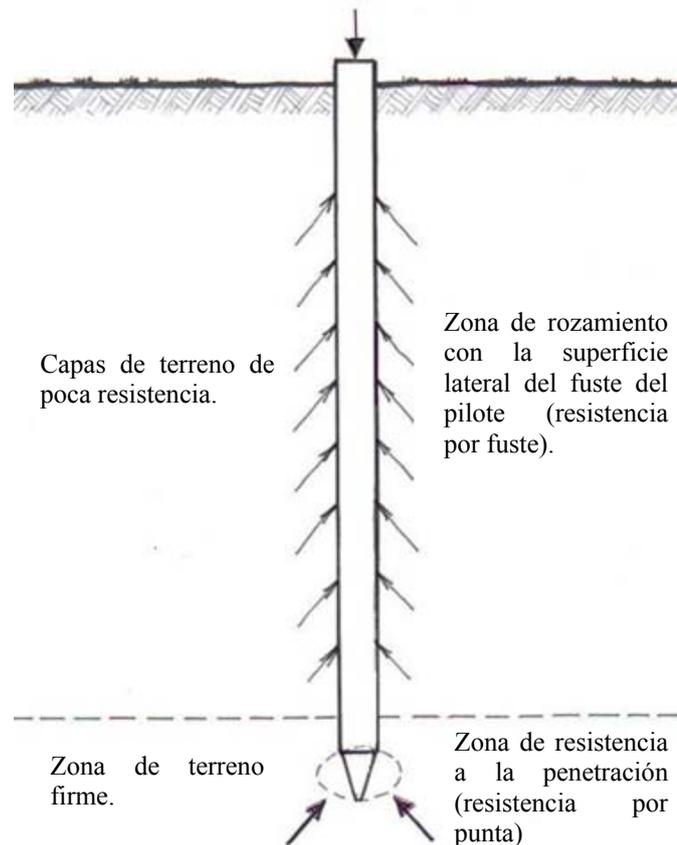


Fig. 1.2 – Funcionamiento de un pilote mediante la resistencia por punta y la resistencia por fuste (fuente: T. Cabrera, "Pilotaje en cimentaciones profundas").

Hay que destacar que, como en toda actividad relacionada con la ingeniería Civil y más con la geotecnia, existe un alto grado de incertidumbre en la capacidad final de un pilote.

Por tanto, la razón principal por la cual se decide utilizar una cimentación a base de pilotes en la construcción de la nueva Terminal de Pasajeros de Cádiz es que el terreno sobre el que tiene que descansar carece de suficiente resistencia en sus estratos superiores, por lo que habrá que buscarla en estratos más profundos.



Fig. 1.3 – Nueva Terminal Marítima de Pasajeros de Cádiz.

2. Naturaleza y características del terreno

Los datos de las características del terreno son extremadamente importantes para el dimensionamiento de las cimentaciones de las estructuras. La cimentación debe transmitir las cargas de las estructuras al suelo distribuyéndolas de forma que no superen su presión admisible ni produzcan cargas zonales. Los ensayos y estudios geológicos y geotécnicos necesarios para la obtención de dichos datos fueron desarrollados por la empresa "Geocisa - Geotecnia y Cimientos S.A." [1] y facilitado por el Departamento de Infraestructuras de la Autoridad Portuaria de la Bahía de Cádiz [2].

2.1 Descripción litológica y características principales del terreno

Se puede decir, de manera general, que el terreno donde va a ir situada la Terminal Marítima tiene una resistencia y calidad baja. Este tiene unas tensiones admisibles de entre 1,50 y 2,00 kg/cm² y en él se pueden distinguir tres zonas o niveles geotécnicos:

- *Zona o nivel geotécnico 1* (cota 0 m a cota -5 m): Formado por un relleno de arena gruesa marrón grisácea con fragmentos cerámicos y restos antrópicos y con la presencia de nódulos carbonatos pulverulentos y duros, cementando en algunos casos la arena. De forma general se puede decir que el nivel freático en

esta franja se encuentra en la cota -2 m. Se despreciará este nivel para el cálculo de las tensiones en el suelo en el dimensionamiento de pilotes.

- *Zona o nivel geotécnico 2* (cota -5 m a cota -10 m): Formado por arena limosa grisácea con bastantes fragmentos bioclásticos de origen marino. Las características principales de esta zona son:
 - Densidad seca (d_s) = 1,52 t/m³
 - Densidad saturada (d_{sat}) = 1,98 t/m³
 - Humedad (h) = 30,5 %
 - Ángulo de rozamiento interno (φ) = 31°
 - Cohesión (c) = 0 t/m²

- *Zona o nivel geotécnico 3* (a partir de la cota -10 m): Formado por arena limosa marrón verdosa con algunos fragmentos de arenisca. Las características principales de esta zona son:
 - Densidad seca (d_s) = 1,72 t/m³
 - Densidad saturada (d_{sat}) = 2,10 t/m³
 - Humedad (h) = 22,4 %
 - Ángulo de rozamiento interno (φ) = 27°
 - Cohesión (c) = 2,5 t/m²

2.1.1 Ensayos de laboratorio y de campo

Los distintos datos e información obtenida de los distintos ensayos y estudios geotécnicos se pueden dividir en dos grupos:

- Ensayos de laboratorio. Consiste en la realización de una serie de ensayos en el propio laboratorio con el fin de obtener distintos datos necesarios para el correcto dimensionamiento de las estructuras. Estos datos o características son:

- *Granulometría*. Indica el porcentaje de material de cada una de las capas o franjas litológicas que pasa por una serie de tamices, en concreto, de los números #10, #40 y #200. Estos datos no se van a utilizar directamente pero servirán de base para saber con qué tipo de suelo se trata.
 - *Plasticidad*. Los límites de Atterberg o límites de consistencia o plasticidad se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos. Los ensayos se realizan en el laboratorio y miden la cohesión del terreno y su contenido de humedad. En este caso se va a indicar el valor del límite líquido (LL) e índice de plasticidad (IP) de los diferentes tipos y estratos de suelo. Estos datos no se utilizarán directamente pero servirán de apoyo en los diferentes cálculos.
 - *Humedad*. Consiste en la obtención del porcentaje de humedad de cada uno de los tipos de terreno. Estos valores se utilizarán para poder obtener las presiones efectivas del terreno mediante el cálculo de las densidades saturadas. Estas serán calculadas mediante la densidad seca y la humedad. Las presiones efectivas se utilizarán en el dimensionamiento de las cimentaciones superficiales y de los pilotes.
 - *Densidad seca*. Consiste en la obtención de la densidad seca en cada uno de los tipos de terreno de las franjas litológicas. Como se dice en el apartado anterior, la densidad seca se utilizará para obtener las presiones efectivas del terreno para poder dimensionar las cimentaciones superficiales y los pilotes.
 - *Ensayo de corte directo*. Este ensayo proporciona la cohesión y el ángulo de rozamiento interno de cada uno de los terrenos. Estos valores se utilizarán para obtener el valor de las resistencias por fuste y por punta de los pilotes.
 - *R.C.S.* Este ensayo proporciona la Resistencia a Compresión Simple de cada uno de los terrenos. Este valor no será utilizado directamente en los dimensionamientos pero dará información acerca de la resistencia del terreno.
- Ensayos de campo. Consiste en la realización de ensayos en la propia zona de actuación. En este caso se va a realizar:
 - *Ensayo de penetración dinámica continua (SPT)*. Será de registro continuo del tipo de penetrómetros dinámicos y será empleado en la caracterización

geotécnica del terreno. Dentro de los penetrómetros dinámicos, el ensayo de penetración estándar o SPT se realiza exclusivamente en el interior de un sondeo y durante su ejecución, y por tanto, no proporcionan una medida continua de la resistencia a la penetración. Consiste en hincar un elemento con punta generalmente cónica en el terreno, desde su superficie hasta la profundidad deseada o hasta alcanzar el rechazo, midiendo la energía necesaria para profundizar intervalos de longitud definida (20 cm en el caso que se trata), siendo esta energía el número de impactos de una maza que se eleva a una altura determinada y se deja caer libremente. Este tipo de ensayo es menos preciso, pero sirve perfectamente para obtener una serie de datos aproximados de las resistencias del terreno. Por cada metro de profundidad se darán 5 datos de golpes, un dato por cada 20 cm de profundidad. Cada dato expresa el número de golpes necesarios para profundizar esos 20 cm. Este número N de golpes necesarios se utilizará para obtener la resistencia por fuste y por punta de los pilote mediante el Método del Ensayo SPT de obtención de la resistencia de hundimiento.

3. Cimentación mediante pilotes CPI-5

3.1 Introducción

Se denomina pilote a un elemento constructivo utilizado en la cimentación de obras, que permite trasladar las cargas producidas hasta un estrato de suelo resistente, cuando este se encuentre a una profundidad tal que hace inviable, técnica y económicamente, una cimentación convencional mediante zapatas o losas.

La cimentación de la Terminal Marítima de Pasajeros se realiza mediante encepados y pilotes en el caso de los edificios principales (edificios *Terminal Marítima* y *Embarque de Pasajeros*) y mediante zapatas en el caso de los edificios secundarios (edificios *Embarque de Vehículos* y *Control de Embarque de Pasajeros*).

En el caso de los dos primeros los encepados están formados por dos pilotes cada uno, excepto bajo los ascensores, donde estos tendrán mayor tamaño y estarán formados por un mayor número de pilotes, debido a que un único encepado une los cuatro pilares de las cuatro esquinas de los ascensores.

En cambio los edificios secundarios, al transmitir una menor carga al terreno y poder ser soportados por estos, están formados por zapatas unidas mediante vigas centradoras y de atado.

3.2 Tipos de pilotes

Los pilotes tienen forma de pilar colocado en el interior del terreno sobre el que se apoya el elemento que le trasmite las cargas (encepado, losa...), y que trasmite la carga al terreno por rozamiento del fuste con el terreno y/o apoyando la punta en capas resistentes. Existen distintos tipos de pilotes [3]:

- *Pilotes in situ*. Son aquellos pilotes cuyo método constructivo consiste en realizar una perforación en el suelo a la cual, una vez terminada, se le coloca un armado en su interior y posteriormente se rellena con hormigón. Existen los siguientes tipos de pilotes in situ:
 - *Pilote in situ de desplazamiento con azuche (CPI-2)*.
 - *Pilote in situ de desplazamiento con tapón de gravas (CPI-3)*.
 - *Pilote in situ de extracción con entubación recuperable (CPI-4)*.
 - *Pilote in situ de extracción con camisa pérdida (CPI-5)*.
 - *Pilote in situ sin entubación con lodos tixotrópicos (CPI-6)*.
 - *Pilote in situ barrenado sin entubación (CPI-7)*.
 - *Pilote in situ barrenado y hormigonado por tubo central de barrena (CPI-8)*.
- *Pilotes hincados*. Son aquellos elementos prefabricados de hormigón o secciones metálicas que se introducen en el terreno mediante pilotadoras. Dichos elementos son colocados verticalmente sobre la superficie del terreno e hincados en el suelo a base de golpes mediante un martinete. Esto hace que el elemento descienda, penetrando en el terreno, tarea que se prolonga hasta que se alcanza la profundidad de diseño o la del estrato resistente, al haberse producido el rechazo del suelo.
- *Pilotes prefabricados*. Los pilotes prefabricados pertenecen a la categoría de cimentaciones profundas, aunque también se los conoce por el nombre de pilotes

premoldeados, ya que pueden estar contruidos con hormigón armado ordinario o con hormigón pretensado. Estos pilotes se clavan en el terreno por medio de golpes que efectúa un martinete o una pala metálica equipada para el hincado de pilotes.

- *Pilotes excéntricos*. Los pilotes excéntricos son aquellos que se ubican fuera de los ejes de las columnas y pilares, ofreciendo ventajas sustanciales respecto de los tradicionales, ya que pueden instalarse después de haberse iniciado la construcción de la estructura.

3.3 Características del pilote utilizado (CPI-5) y justificación de su elección

Una vez definido el tipo de terreno y las características principales de este, y antes de iniciar con el proceso de dimensionamiento de los pilotes, es necesario decidir el tipo de pilote que se va a utilizar [4].

Se decide utilizar pilotes de realización in situ debido a los daños que podrían producir las vibraciones de un pilote prefabricado durante su clavado en el terreno a las estructuras y edificio históricos cercanos.

Para la elección del tipo de pilote in situ a utilizar es necesario realizar un estudio severo del terreno y sus características para poder obtener los datos necesarios para la elección del pilote más conveniente según esa normativa. Por tanto, para su elección habrá que basarse en todo lo citado en el punto anterior.

La Tabla 1 permite obtener, con carácter orientativo, la elección del pilotaje recomendable, en función de la naturaleza de los estratos del terreno, de la relación entre la resistencia por punta P y la resistencia por fuste F , de la carga media por pilar y del número de pilares del edificio. El tipo de pilotaje más adecuado coincide con la puntuación más alta y de aplicar otro tipo de criterios teóricos y constructivos.

	Puntuación básica	Sumandos correctores			Valor final
		Relación entre P y F	Atraviesa antes de llegar a las capas o antes de las mismas	Carga media por pilar de la estructura	
	$P \leq 3F$ y estrato granular de gravas finas o arenas sueltas en profundidad	Capas de terreno granular fino en presencia de agua	0-200 t	20-100	
CPI-2	3	-1,5	+0,5	+0,0	2,0
CPI-3	5	-1,0	+0,5	+0,0	4,5
CPI-4	1	-1,5	+1,0	+1,0	1,5
CPI-5	2	+0,5	+1,0	+0,5	4,0
CPI-6	1	-1,5	+0,5	+0,0	0,0
CPI-7	NO	-2,0	-0,0	+0,5	NO
CPI-8	1	-1,5	+0,5	+0,5	0,5

Tabla 3.1 – Elección del tipo de pilote a utilizar en los edificios principales.

Los dos tipos de pilotes con mayor puntuación son el *CPI-3* y el *CPI-5*. En el caso de esta actuación se va a optar por el pilote tipo *CPI-5* ya que permite su utilización en presencia de agua y con flujos de este, elementos que se producirán en el dique donde van situados dentro del puerto de la ciudad de Cádiz.

El tipo *CPI-5* es un pilote de extracción con camisa perdida, usualmente utilizado como pilote trabajando por punta apoyado en roca o capas duras de terreno y siempre que se atraviesen capas de tierra no incoherente fina en presencia de agua, o exista flujo de agua y en algunos casos con capas de terreno coherente blando, cuando existan capas agresivas al hormigón fresco. Se utilizará para proteger un tramo de los pilotes expuestos a la acción de un terreno agresivo al hormigón fresco o a un flujo de agua.

Las fases para la realización de un pilote in situ del tipo *CPI-5* son las siguientes:

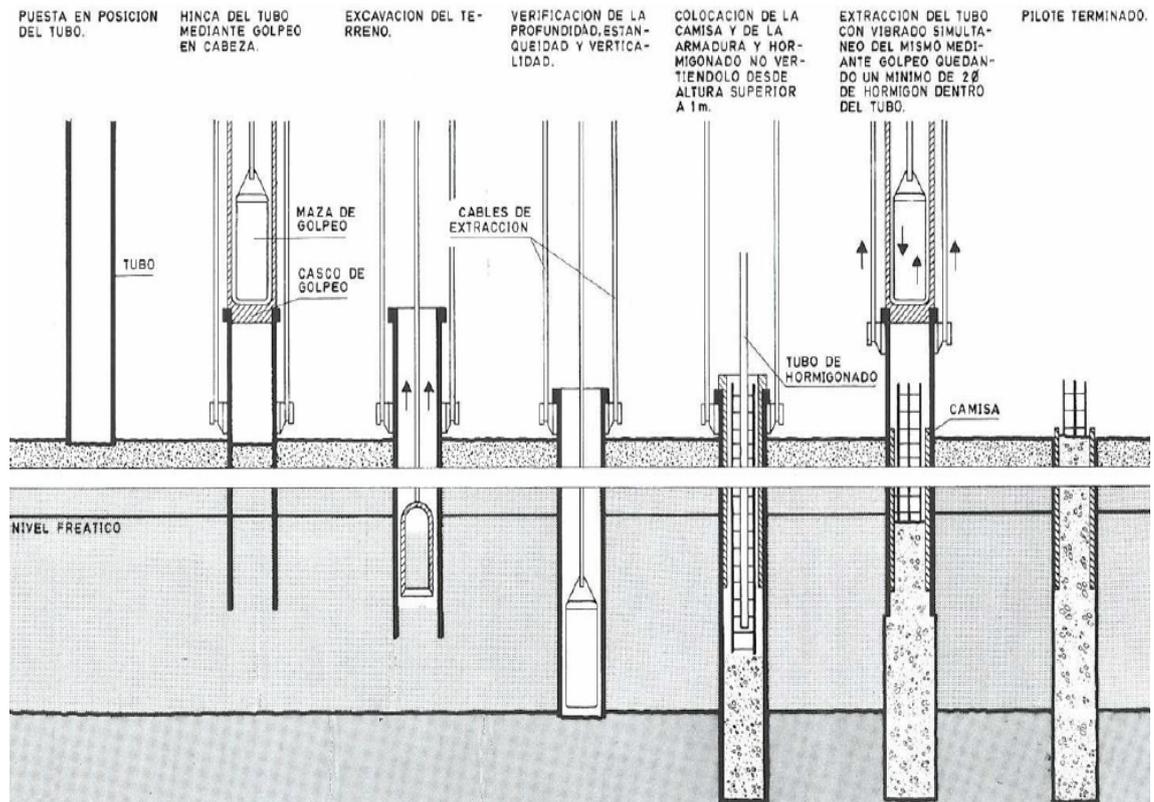


Fig. 3.1 – Fases de ejecución de un pilote de extracción con camisa perdida CPI-5 (fuente: E.U.A.T.M.).

Respecto a la ejecución destacar que el pilote *CPI-5* conlleva un procedimiento complejo. El tipo de excavación dependerá del terreno sobre el que nos encontremos:

- La excavación sobre terrenos blandos y medios se realiza mediante el uso de barrenas de hélice cortas.
- En el caso de terrenos más duros se hace necesaria la inclusión en la barrena de dientes con puntas de widia.
- En terrenos muy competentes y terreno rocosos se utiliza una corona circular con puntas de widia.

Mientras se va realizando la excavación de los pilotes *CPI-5* se introduce una entubación a modo de sostenimiento de las paredes de la excavación que se mantiene

permanentemente. Debido a eso se conocen como pilotes de entubación o camisa perdida.

Una vez se alcanza la profundidad objetivo se realiza la limpieza del fondo de la excavación mediante el uso de un cazo o "bucket". Posteriormente al limpiado del fondo se procede a introducir la armadura de acero con la ayuda de un equipo auxiliar. Para garantizar el recubrimiento mínimo necesario de la misma, se levanta 20 cm sobre el fondo de la excavación y se colocan separadores para su correcto centrado.

Después de colocar la armadura se comienza con el hormigonado. Para verter el hormigón dentro de la perforación correctamente evitando segregaciones y exudaciones, se utiliza un tubo tremie. Este tubo se introduce por dentro de la armadura hasta alcanzar el fondo de la perforación. A continuación se comienza a bombear el hormigón que debe ser de consistencia fluida.

Conforme avanza la fase de hormigonado se va subiendo simultáneamente el tubo tremie, pero teniendo la precaución de mantenerlo siempre unos dos metros introducido en el hormigón fresco. Cuando el hormigón alcanza la cota de la rasante del terreno se concluye con el hormigonado.

El pilote *CPI-5* es muy caro por el alto coste de la entubación perdida. Solo es utilizado en condiciones extremas como en el caso de manantiales de agua, mareas, puertos, terrenos muy contaminados y agresivos, etc [5].

3.4 Características básicas del dimensionamiento

Para el dimensionamiento de los pilotes se utiliza el Código Técnico de la Edificación - Seguridad Estructural - Cimientos [6].

Según esta normativa, para el dimensionamiento de las cimentaciones profundas es necesario suponer una serie de características de los pilotes y realizar distintas comprobaciones. Las características a suponer son:

- Valor de la longitud del pilote (L).
- Número de pilotes (N) por encepado.

- Diámetro (D) de estos.

Para realizar el dimensionamiento, cálculo y comprobación de los pilotes es necesario examinar diferentes aspectos. No se verifican todos ya que no siempre afectan en los distintos casos.

En esta actuación solo se comprueban aquellos aspectos que vayan a influir directamente en el dimensionamiento de los pilotes *CPI-5* y con las características de estos terrenos:

- Estados Límites Últimos (ELU):
 - Fallo de la estabilidad global (terreno-cimiento) del terreno (resistencia al hundimiento).
 - Capacidad estructural del pilote (tope estructural).
 - Rotura por arrancamiento del pilote.
 - Rotura horizontal del terreno bajo cargas del pilote.
- Estados Límites de Servicio (ELS):
 - Desplazamientos verticales del pilote (asientos).
- Otras consideraciones:
 - Efecto del rozamiento negativo en el pilotaje.
 - Efecto grupo.

Una vez realizado el estudio de los aspectos anteriores con diferentes valores de longitud de pilote (L), número de pilotes por encepado (N) y diámetro de estos (D), se llega a la conclusión que los valores finales de estos tres elementos son (cálculos y comprobaciones de estos valores expresados más adelante):

- Longitud, $L = 12$ m.

- Número de pilotes por encepado, $N = 2$, excepto los encepados situados bajo los ascensores, que tendrán un $N = 6$ y $N = 9$ en el edificio *Terminal Marítima* y $N = 6$ en el edificio *Embarque de Pasajeros*.
- Diámetro de los pilotes, $D = 0,55$ m.

3.5 Acciones máximas sobre el terreno

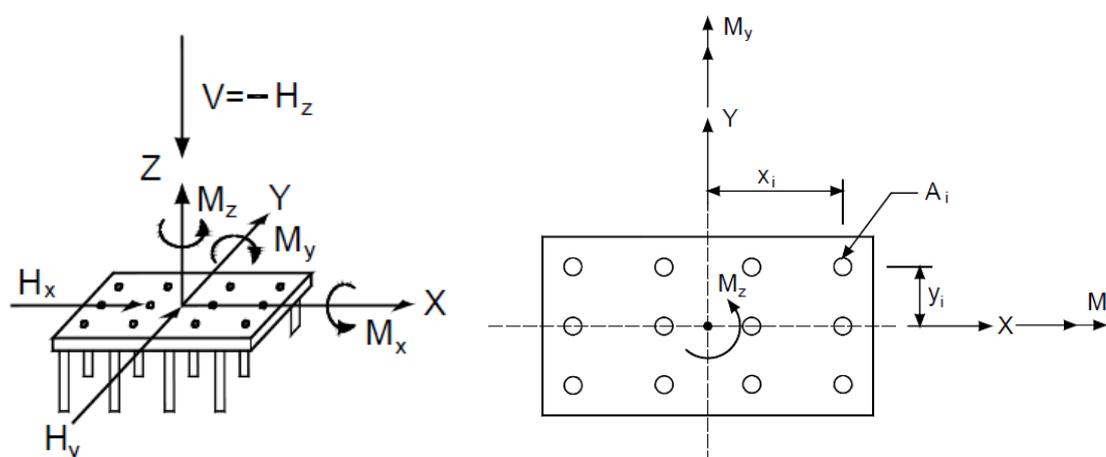


Fig. 3.2 – Acciones, mediciones y áreas a considerar en el dimensionamiento (fuente: CTE-SE-C).

En la Figura 5 se pueden observar las acciones, mediciones y áreas que se necesitan conocer para poder realizar el dimensionamiento de los pilotes.

El paso previo para dimensionar los pilotes es obtener las acciones máximas resultantes de la estructura sobre el terreno. Para el cálculo de estas acciones se van a tomar los esfuerzos máximos transmitidos al terreno por el pilar que transmita mayores cargas. De esa manera el dimensionamiento del pilote tendrá un alto grado o factor de seguridad.

Por tanto, en el caso de esta actuación, las acciones transmitidas por el pilar con mayores esfuerzos y las distancias y áreas necesarias son:

- Esfuerzos verticales $\rightarrow V = 70,64 \text{ t}$
- Esfuerzos horizontales $\rightarrow H_x = 0 \text{ t}$
 $\rightarrow H_y = 0 \text{ t}$

- Momentos $\rightarrow M_x = 1,55 \text{ t} \cdot \text{m}$
 $\rightarrow M_y = 5,25 \text{ t} \cdot \text{m}$
 $\rightarrow M_z = 0 \text{ t} \cdot \text{m}$
- Sección del pilote $\rightarrow A = \pi \cdot \left(\frac{0,55}{2}\right)^2 = 0,2376 \text{ m}^2$
- Distancias $\rightarrow X = 0,85 \text{ m}$
 $\rightarrow Y = 0 \text{ m}$ (el número de pilotes por encepado es 2)

Por lo tanto sustituyendo, y según el CTE-SE-C, el axil y los cortantes resultantes para este estudio son:

- **Axil:**

$$\rightarrow N = \frac{A}{\sum A} \cdot V \pm \frac{A \cdot Y}{\sum A \cdot Y^2} \cdot M_x \pm \frac{A \cdot X}{\sum A \cdot X^2} \cdot M_y = 38,41 \text{ t} \quad (1)$$

- **Cortante en X:**

$$\rightarrow H_x = \frac{A}{\sum A} \cdot H_x \pm \frac{A^2 \cdot Y}{\sum A^2 \cdot (X^2 + Y^2)} \cdot M_z = 0 \text{ t} \quad (2)$$

- **Cortante en Y:**

$$\rightarrow H_y = \frac{A}{\sum A} \cdot H_y \pm \frac{A^2 \cdot X}{\sum A^2 \cdot (X^2 + Y^2)} \cdot M_z = 0 \text{ t} \quad (3)$$

3.6 Comprobación de la resistencia al hundimiento

La resistencia al hundimiento es uno de los aspectos más importantes a considerar y comprobar en el dimensionamiento de los pilotes. Se podrá producir este modo de rotura cuando la carga vertical sobre la cabeza del pilote supere la resistencia del terreno causando asientos desproporcionados.

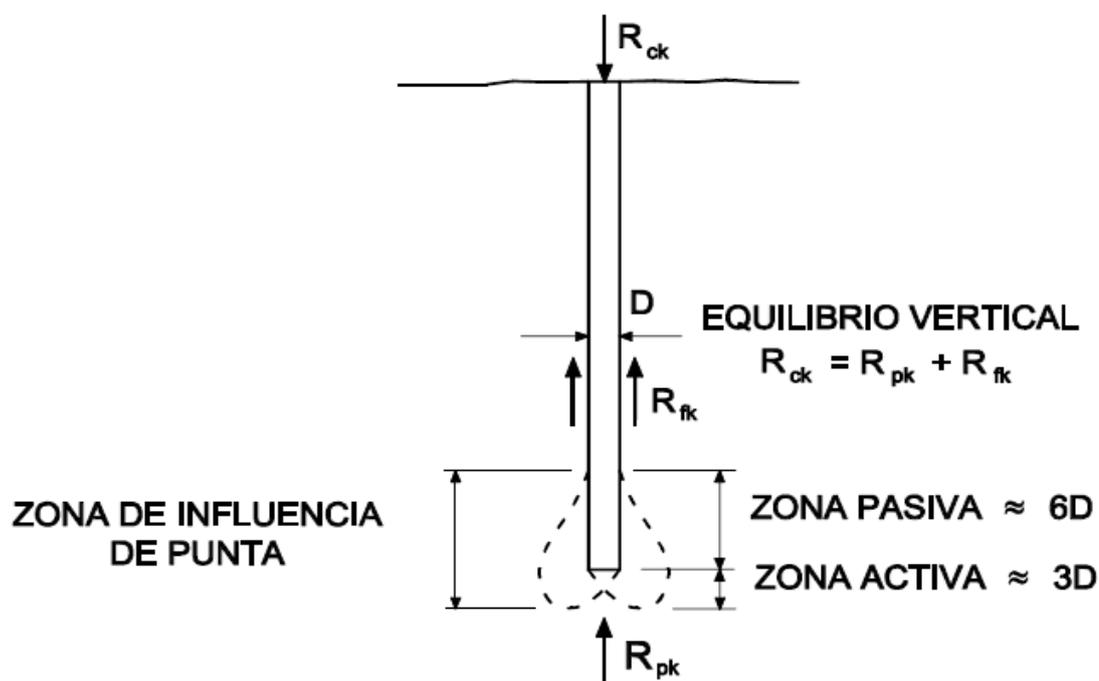


Fig. 3.3 – Esquema de distribución de la carga de un pilote aislado (fuente: CTE-SE-C).

Existen dos métodos o procedimientos de cálculo respecto a su obtención:

- *Soluciones Analíticas*: Consiste en la obtención de la resistencia por punta P y resistencia por fuste F mediante datos del terreno obtenidos en laboratorio (ángulo de rozamiento interno, cohesión, densidad y humedad). Consiste en un procedimiento más exacto pero más lento de obtener.
- *Ensayo SPT*: Consiste en la obtención de la resistencia por punta P y resistencia por fuste F mediante ensayos de penetración dinámica. Es un procedimiento más rápido pero menos exacto, aunque en muchos casos puede ser suficiente.

En el caso de esta actuación, el procedimiento de cálculo de los pilotes se va a realizar según el método de soluciones analíticas.

Según la normativa utilizada (CTE-SE-C), la carga de hundimiento de un pilote aislado se considera dividida en dos partes: *resistencia por punta P* y *resistencia por fuste F*. Por lo tanto, el valor de la carga de hundimiento (R_{ck}) es igual a:

$$R_{ck} = R_{pk} + R_{fk} \quad (4)$$

Siendo:

- R_{pk} la parte de la resistencia que se supone soportada por la punta.
- R_{fk} la parte de la resistencia que se supone soportada por el contacto pilote - terreno en el fuste.

Para estimar ambas componentes de la resistencia se supondrá que son proporcionales a las áreas de contacto respectivas. A continuación se expresa el cálculo necesario para obtener ambas componentes de la carga de hundimiento.

3.6.1 Resistencia por punta (entre paréntesis se indicarán los valores obtenidos)

La ecuación para la obtención de la resistencia por punta es la siguiente:

$$R_{ck} = q_p + A_p \quad (5)$$

Siendo:

- q_p la resistencia unitaria por la punta ($q_p = 4,637 \text{ MPa}$).
- A_p el área de la punta ($A_p = 0,2376 \text{ m}^2$).

La resistencia unitaria de hundimiento por punta de pilotes en suelos granulares se podrá estimar con la expresión siguiente:

$$q_p = f_p + \sigma'_{yp} \cdot N_q \leq 20 \text{ MPa} \quad (6)$$

Siendo:

- $f_p = 3$ para pilotes hincados y 2,5 para pilotes hormigonados in situ. En este caso se trata de un pilote hormigonado in situ ($f_p = 2,5$).
- σ'_{yp} la presión vertical efectiva al nivel de la punta antes de instalar el pilote. Como el pilote tiene una longitud de 12 metros, consistirá en obtener el valor de esa presión efectiva a la cota -12 metros ($\sigma'_{yp \text{ 12 m}} = 14,052 \text{ t/m}^2 = 0,14052 \text{ MPa}$)
- N_q el factor de capacidad de carga definido por la expresión ($N_q = 13,199$):

$$N_q = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \cdot e^{\pi \tan\varphi} \quad (7)$$

Siendo:

- φ el ángulo de rozamiento interno ($\varphi = 27^\circ$).

Por lo tanto, sustituyendo en la ecuación de la resistencia por punta nos queda:

$$R_{pk} = q_p \cdot A_p = 4,637 \cdot 10^2 \cdot 0,2376 = 110,175 \text{ t} \quad (8)$$

3.6.2 Resistencia por fuste (entre paréntesis se indicarán los valores obtenidos)

En este caso la resistencia total por fuste se considerará como un sumatorio con un término por cada tramo, ya que esta es constante por tramos y también lo es la longitud del contorno del pilote en cualquier sección horizontal:

$$R_{fk} = \sum \tau_f \cdot A_f \quad (9)$$

Siendo:

- τ_f la resistencia unitaria por el fuste en cada tramo ($\sum \tau_f = 270,722 \text{ kPa}$).
- A_f el área de contacto entre el fuste del pilote y el terreno en cada tramo ($A_f = 2\pi \times 0,55/2 = 1,7279 \text{ m}^2$).

Para obtener la resistencia unitaria de hundimiento por fuste habrá que calcularla, en este caso, en cada metro y realizar su sumatorio en la longitud de pilote considerado. En el caso de suelos granulares se podrá estimar con la expresión siguiente:

$$\tau_f = \sigma'_v \cdot K_f \cdot f \cdot \tan\varphi \leq 120 \text{ kPa} \quad (10)$$

Siendo (en cada metro):

- σ'_v la presión vertical efectiva al nivel considerado ($\sigma'_{v 5-6 \text{ m}} = 74,12 \text{ kPa}$, $\sigma'_{v 6-7 \text{ m}} = 83,96 \text{ kPa}$, $\sigma'_{v 7-8 \text{ m}} = 93,80 \text{ kPa}$, $\sigma'_{v 8-9 \text{ m}} = 103,64 \text{ kPa}$, $\sigma'_{v 9-10 \text{ m}} = 113,48 \text{ kPa}$, $\sigma'_{v 10-11 \text{ m}} = 123,93 \text{ kPa}$, $\sigma'_{v 11-12 \text{ m}} = 134,99 \text{ kPa}$).
- K_f el coeficiente de empuje horizontal. Para pilotes hincados se tomará $K_f = 1$, para pilotes perforados se tomará $K_f = 0,75$ y para pilotes híbridos ejecutados con ayudas que reducen el desplazamiento del terreno se tomará un valor intermedio en función de la magnitud de esa ayuda. En este caso se trata de un pilote perforado ($K_f = 0,75$).
- φ el ángulo de rozamiento interno del suelo granular ($\varphi = 31^\circ$).
- f el factor de reducción del rozamiento del fuste. Para pilotes de hormigón in situ o de madera se tomará $f = 1$, para pilotes prefabricados de hormigón se tomará $f = 0,9$ y para pilotes de acero en el fuste se tomará $f = 0,8$. En este caso se trata de un pilote de hormigón in situ ($f = 1$).

Por lo tanto, sustituyendo en la ecuación de la resistencia por fuste nos queda:

$$R_{fk} = \sum \tau_f \cdot A_f = 270,722 \cdot 10^{-1} \cdot 1,7279 = 46,778 \text{ t} \quad (11)$$

3.6.3 Resistencia o carga de hundimiento y resistencia de hundimiento de cálculo

Sustituyendo en la ecuación de la carga de hundimiento los dos valores antes calculados (resistencia por punta y resistencia por fuste) nos queda:

$$R_{ck} = R_{pk} + R_{fk} = 110,175 + 46,778 = 156,953 \text{ t} \quad (12)$$

Por último decir que la carga de hundimiento de cálculo equivale a la carga de hundimiento partido por un coeficiente global de seguridad. Por lo que:

$$R_{cd} = \frac{R_{ck}}{\gamma_R} \geq N \quad (13)$$

Siendo:

- R_{cd} la carga de hundimiento de cálculo.
- R_{ck} la carga de hundimiento.
- γ_R el coeficiente global de seguridad de la carga de hundimiento que tendrá un valor de 3.
- N la acción vertical (axil de cálculo) máxima transmitida por el pilar con mayores esfuerzos ($N = 38,41 \text{ t}$).

Por lo que sustituyendo en dicha ecuación obtenemos la carga de hundimiento de cálculo y comprobamos si esta es mayor al axil de cálculo, y por tanto, lo resiste:

$$R_{cd} = \frac{156,953}{3} = 52,32 \text{ t} \geq 38,41 \text{ t} \quad (14)$$

Por lo tanto, según la resistencia o carga de hundimiento y el método de soluciones analíticas el pilote supuesto ($L = 12 \text{ m}$, $N = 2$, $D = 0,55 \text{ m}$) es válido.

3.7 Comprobación de la capacidad estructural del pilote

La capacidad estructural del pilote o tope estructural es otro de los aspectos importantes a considerar y comprobar en el dimensionamiento de los pilotes. Las cargas transmitidas a los pilotes en su cabeza inducen esfuerzos en los mismos que pueden dañar su estructura. La ecuación a utilizar para su comprobación es la siguiente:

$$Q_{\text{tope}} = \sigma \cdot A \quad (15)$$

Siendo:

- σ la tensión del pilote, que se obtiene directamente de una tabla de la normativa entrando con el procedimiento constructivo del pilote, el tipo de pilote y de suelo. En este caso se trata de un pilote perforado, entubado y un suelo de tipo firme ($\sigma = 5 \text{ MPa}$).
- A el área de la sección transversal ($A = \pi \times (0,55/2)^2 = 0,2376 \text{ m}^2$).

Sustituyendo en la ecuación de la capacidad estructural del pilote nos queda:

$$Q_{\text{tope}} = \sigma \cdot A = 5 \cdot 10^2 \cdot 0,2376 = 118,80 \text{ t} \quad (16)$$

Por último decir, como en el caso de la carga de hundimiento, que el tope estructural de cálculo equivale al tope estructural partido por un coeficiente global de seguridad. Por lo que:

$$Q_{\text{tope,c}} = \frac{Q_{\text{tope}}}{\gamma_R} \geq N \quad (17)$$

Siendo:

- $Q_{\text{tope,c}}$ el tope estructural de cálculo.
- Q_{tope} el tope estructural.
- γ_R el coeficiente global de seguridad del tope estructural ($\gamma_R = 3$).

- N la acción vertical (axil de cálculo) máxima transmitida por el pilar con mayores esfuerzos ($N = 38,41 \text{ t}$).

Por lo que sustituyendo en dicha ecuación obtenemos el tope estructural de cálculo y comprobamos si esta es mayor al axil de cálculo, y por tanto, lo resiste:

$$Q_{\text{tope}} = \frac{118,80}{3} = 39,60 \text{ t} \geq 38,41 \text{ t} \quad (18)$$

Por lo tanto, según la capacidad estructural el pilote supuesto ($L = 12 \text{ m}$, $N = 2$, $D = 0,55 \text{ m}$) es válido.

3.8 Otros tipos de comprobaciones

Después de realizar las comprobaciones de resistencia al hundimiento y capacidad estructural del pilote, se llevan a cabo otro tipo de comprobaciones de menor importancia a las anteriores.

3.8.1 Comprobación de la rotura por arrancamiento del pilote

Los pilotes podrán utilizarse para soportar cargas de tracción en su cabeza. Si estas cargas exceden la resistencia al arrancamiento, el pilote se desconecta del terreno, rompiendo su unión y produciéndose el consiguiente fallo.

Debido a que en este caso no existe ningún tipo de esfuerzo de tracción en las estructuras no se va a producir la rotura por arrancamiento del pilote.

3.8.2 Comprobación de la rotura horizontal del terreno bajo cargas del pilote

Cuando las cargas horizontales aplicadas en los pilotes producen en el terreno tensiones que éste no puede soportar, se producen deformaciones excesivas o incluso, si el pilote es corto y suficientemente resistente como estructura, el vuelco del mismo.

La rotura horizontal del terreno bajo cargas del pilote no se va a producir ya que no existe ningún tipo de esfuerzo cortante.

3.8.3 Comprobación de los desplazamientos verticales del pilote (asientos)

Tanto al proyectar pilotes aislados como grupos de pilotes, deben realizarse las comprobaciones relacionadas con los asientos, en los que influye no sólo la resistencia del terreno sino también su deformabilidad. Al calcular los asientos puede pasar dos cosas:

- El asiento en los pilotes sea un aspecto crítico → En este caso será conveniente la realización de pruebas de carga especialmente diseñadas para la determinación de asientos a largo plazo, única manera precisa de conocer la relación carga - asiento.
- El asiento en los pilotes no resulte crítico → Destacar que los asientos se calcularán tanto para el pilote aislado como teniendo en cuenta el efecto grupo, debiéndose cumplir que los valores así estimados deben ser menores que los límites admisibles para los estados límite de servicio.

Los asientos en este tipo de pilote van a ser escasos y menores que el asiento admisible exigido en este caso.

3.8.4 Comprobación del efecto del rozamiento negativo del pilote

El rozamiento negativo se produce cuando el asiento del terreno circundante al pilote es mayor que el propio asiento del pilote. En este caso, el pilote soporta, además de la carga que le transmite la estructura, parte del peso del terreno. Como consecuencia, esta situación produce que aumente la carga total de compresión que el pilote tiene que soportar. Debe estudiarse el rozamiento negativo cuando se dé alguna de las siguientes circunstancias:

- Consolidación por su propio peso de rellenos o niveles de terreno de reciente deposición.
- Consolidación de niveles compresibles bajo sobrecargas superficiales.
- Variaciones del nivel freático.
- Humectación de niveles colapsables.
- Asientos de materiales granulares inducidos por cargas dinámicas.
- Subsidiencias inducidas por excavaciones o disolución de materiales profundos.

La identificación del problema puede realizarse comparando, mediante un cálculo previo, los asientos del terreno y del pilote. En general, es suficiente una pequeña diferencia de asientos para que se produzca la situación de rozamiento negativo. Un asiento de 1 cm puede producir ya efectos notables.

Debido a que en esta actuación no se da ninguna de las circunstancias citadas no se va a producir rozamiento negativo.

3.8.5 Comprobación del efecto grupo

El efecto grupo se produce cuando la separación entre ejes de pilotes es inferior a tres diámetros.

En este caso no se va a producir efecto grupo ya que la distancia entre ejes de pilotes es superior a los tres diámetros.

4. Conclusiones

La cimentación por pilotes CPI-5 en los edificios de la Terminal Marítima y Embarque de pasajeros de la ciudad de Cádiz proporciona unas bases resistentes con un alto grado de seguridad pero con un coste bastante elevado.

El paso previo al dimensionamiento de los pilotes es tener un alto conocimiento de la naturaleza y las características principales del terreno, ya que los pilotes transmiten las cargas de las estructuras al suelo, teniendo que ser distribuidas uniformemente de forma que no se supere la presión admisible ni se produzcan cargas zonales. Es necesario conocer las características principales de cada uno de los estratos o zonas, mediante la realización de diferentes ensayos.

Para el dimensionamiento de los pilotes en cimentaciones profundas es necesario suponer una serie de parámetros; la longitud (L), el diámetro (D) y el número de pilotes (N) a utilizar.

Para realizar el cálculo y comprobar los pilotes, es necesario examinar aquellos aspectos que van a influir directamente en su dimensionamiento teniendo en cuenta las características del terreno. Generalmente se suele examinar:

- Estados Límites Últimos (ELU):
 - Fallo de la estabilidad global (terreno-cimiento) del terreno (resistencia al hundimiento).
 - Capacidad estructural del pilote (tope estructural).
 - Rotura por arrancamiento del pilote.
 - Rotura horizontal del terreno bajo cargas del pilote.
- Estados Límites de Servicio (ELS):
 - Desplazamientos verticales del pilote (asientos).
- Otras consideraciones:
 - Efecto del rozamiento negativo en el pilotaje.
 - Efecto grupo.

Una vez realizadas las comprobaciones del cálculo del dimensionamiento con diferentes valores de longitud de pilote (L), número de pilotes por encepado (N) y diámetro de estos (D), se utilizarán aquellos que cumplan todos los aspectos con un grado de seguridad determinado. En el caso de los pilotes dimensionados en este estudio los valores finales de estos tres aspectos fueron:

- Longitud, $L = 12$ m.
- Diámetro de los pilotes, $D = 0,55$ m.
- Número de pilotes por encepado, $N = 2$, excepto los encepados situados bajo los ascensores, que tendrán un $N = 6$ y $N = 9$ en el edificio *Terminal Marítima* y $N = 6$ en el edificio *Embarque de Pasajeros*.

El número total de pilotes ascenderá a 225, con 149 en el edificio *Terminal Marítima* y 76 en el edificio *Embarque de Pasajeros*.

5. Bibliografía

- [1] Geocisa - Geotecnia y Cimientos S.A.
- [2] Puerto de la Bahía de Cádiz, Departamento de Infraestructuras, Autoridad Portuaria de la Bahía de Cádiz. Regido por el Real Decreto Legislativo 2/2011, de 5 de septiembre, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante.
- [3] A. Muelas Rodríguez, "Manual de Mecánica de Suelo y Cimentaciones", *Capítulo 5: Cimentaciones profundas. Universidad Nacional de Educación a distancia (UNED)*.
- [4] Norma Tecnológica de la Edificación NTE-CPE, Cimentaciones - Pilotes - Encepados. *BOE número 284 de 28 de noviembre de 1978, páginas 26949 a 26972*.
- [5] T. Cabrera, "Pilotaje en cimentaciones profundas". *Revisado el 8 octubre 2013. Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid (ETSEM), UPM. <http://www.tocasa.es/ingeniero/CIMENTACIONES.htm>*
- [6] Código Técnico de la Edificación CTE. *BOE número 74 de 28 de marzo de 2006, páginas 11816 a 11831*.