

02-019

INCLINED PILES: REGULATORY FRAMEWORK AND ADVANTAGES AND DRAWBACKS OF ITS USE IN BUILDING PROJECTS IN SEISMICALLY ACTIVE REGIONS.

Padrón Hernández, Luis Alberto; Medina, Cristina; Álamo, Guillermo Manuel; Aznárez, Juan José; Santana, Ariel; Maeso, Orlando; García, Fidel; Chirino, Francisco
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

The regulatory framework currently in force in Spain regarding the construction processes contains very few references to the use of inclined piles in building projects. In the case of constructions located in seismically active regions, Part 5 of Eurocode 8 (Design of structures for earthquake resistance – Foundations, retaining structures and geotechnical aspects) dictates that if inclined piles are used, they should be designed to safely carry axial loads as well as bending loads, but notes that inclined piles are not recommended for transmitting lateral loads to the soil. This situation is due partly to the lack of technical knowledge to support such rule developments, and partly to several structural failures observed in different seismic events in the late eighties and early nineties. However, and despite the existence of disadvantages, several studies suggest a beneficial role of inclined piles for the foundation itself but also for the whole building. This paper discusses briefly some aspects related to the regulatory framework affecting this type of foundation system. Then, different results will be presented in order to illustrate the possible advantages and drawbacks of its use in building projects in seismically active regions.

Keywords: *Piles; Inclined piles; Batter piles; Deep foundations; Earthquake resistant construction*

PILOTES INCLINADOS: SITUACIÓN NORMATIVA Y VENTAJAS E INCONVENIENTES DE SU USO EN PROYECTOS DE EDIFICACIÓN EN ZONAS CON RIESGO SÍSMICO

El marco normativo vigente en España en el ámbito de los procesos de edificación contiene muy pocas referencias a la utilización de pilotes inclinados en el proyecto del edificio. En el caso concreto de construcciones ubicadas en zonas con riesgo sísmico, la parte 5 del Eurocódigo 8 (Proyecto de estructuras frente a sismo. Cimentaciones, depósitos y aspectos geotécnicos) especifica únicamente que en el caso de utilizar pilotes inclinados, éstos deberán ser dimensionados ante cargas axiales y flectores, pero desaconseja su uso para transmitir cargas horizontales al suelo. Esta situación es debida en parte a la falta de conocimientos técnicos que respalden un desarrollo normativo más profundo, y en parte a diversos fallos estructurales observados en distintos eventos de finales de los 80 y principios de los 90. Sin embargo, y a pesar de la existencia de inconvenientes en su uso, diversos estudios apuntan también a posibles beneficios tanto para la cimentación como para la edificación en su conjunto. En este artículo se discutirán brevemente algunos aspectos relacionados con la situación normativa de este sistema de cimentación y se mostrarán distintos resultados para ilustrar las posibles ventajas e inconvenientes de su uso en proyectos de edificación en zonas con riesgo sísmico.

Palabras clave: *Pilotes; pilotes inclinados; cimentaciones profundas; construcción sismorresistente*

Correspondencia: Luis Alberto Padrón luis.padron@ulpgc.es

Agradecimientos: Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto de investigación BIA 2010-21399-C02-01, financiado por la Subdirección General de Proyectos de Investigación (MICINN) y Fondos FEDER. Está también vinculado al proyecto de investigación precompetitivo ULPGC2013-08 financiado por la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria dentro del programa de ayudas a la investigación convocatoria 2013. Cristina Medina y Guillermo Álamo son beneficiarios del programa de becas predoctorales de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC). Ariel Santana es beneficiario de un contrato predoctoral FPI (BES-2009-029161) financiado por el MINECO.

1. Introducción

Son muchas las razones que pueden aconsejar la consideración de cimentaciones profundas en proyectos de edificación o de infraestructuras. Por un lado, razones vinculadas directamente con el terreno de cimentación: suelos de baja capacidad portante, estratos superiores de terreno de relleno o de muy mala calidad, existencia de zonas con peligro de licuefacción, o previsión de variaciones estacionales en términos de hinchamientos y retracciones del terreno como por ejemplo los vinculados a la existencia de arcillas expansivas. Por otro lado, razones derivadas de las características o requerimientos de la estructura soportada: cargas horizontales y/o de vuelco significativas, o requisitos elevados en términos de estabilidad o de limitación de desplazamientos o de asentos.

Puede incluso darse el caso de que las prestaciones de una cimentación profunda convencional de pilotes verticales sean también insuficientes. Esto puede ocurrir cuando las cargas horizontales son importantes (como pueden ser los casos de vientos en edificios altos y expuestos o singulares, impactos, sismo o contención de tierras u otros materiales en estructuras diseñadas para tal fin), y/o en casos en los que los pilotes tengan tramos aéreos, como puede ser en estructuras elevadas sobre el terreno o en algunos tipos de muelles y embarcaderos. En estas situaciones, una alternativa más económica y eficaz puede ser el uso de pilotes inclinados.

Los pilotes inclinados eran ya utilizados con asiduidad a principios del siglo XX para soportar grandes cargas laterales en puentes y muelles. José Eugenio Ribera, ingeniero emprendedor, innovador y pionero en el proyecto y el uso del hormigón armado en España, ya describe hace casi un siglo (Ribera, 1926) cómo la utilización de pilotes inclinados era ya común en países como Alemania o los Estados Unidos de América. De hecho, los pilotes inclinados fueron la opción preferida en muchos casos hasta bien entrada la segunda mitad del siglo XX debido, entre otras razones, a la falta de metodologías adecuadas de análisis del sistema suelo-cimentación (lo que favorecía el uso de configuraciones con una respuesta horizontal más intuitiva como las de pilotes inclinados), y debido también a la escasa resistencia a flexión de muchos de los tipos de pilotes utilizados entonces, como era el caso de los pilotes de madera (Ravazanjian, 2006). Aún tras la mejora generalizada de las tecnologías de cálculo, diseño y ejecución de cimentaciones profundas, los pilotes inclinados seguían utilizándose de manera general para soportar grandes cargas laterales y controlar los desplazamientos generados por ellas hasta los años setenta y ochenta del siglo XX.

Con todo, a día de hoy, la instalación de pilotes inclinados es percibida como bastante más compleja que la de pilotes verticales, y son prescritos de forma puntual como solución en casos de grandes cargas horizontales que no pueden ser resistidas por otros métodos, y más comúnmente en situaciones en las que se estima que la estructura no va a estar sometida a cargas sísmicas. Esto último es debido al hecho de que la legislación actual de referencia (en Europa, el Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes) desaconseja su uso en zonas con riesgo sísmico por dos motivos principales, relacionados entre sí: 1.- la falta de conocimientos científicos y técnicos que respalden un desarrollo normativo más profundo; 2.- diversos fallos estructurales observados en distintos eventos del siglo pasado, la mayoría a finales de los años ochenta y principios de los noventa.

Tal y como se comentó anteriormente, eran muchas las estructuras que, estando en uso a finales del siglo XX, incorporaban pilotes inclinados como parte de sus sistemas de cimentación. En el momento de su diseño y cálculo, las metodologías de análisis disponibles eran muy poco rigurosas e incorporaban hipótesis simplificativas de calado. En general, no se consideraban modelos continuos de interacción entre el suelo y los pilotes, y se simplificaba el modelo considerando que los pilotes estaban articulados tanto en la punta como en la cabeza, lo que permite asumir que los pilotes transmiten exclusivamente cargas

axiles y realizar un estudio sencillo e intuitivo del comportamiento del sistema (Gazetas y Mylonakis, 1998; Gerolymos et al., 2008). De hecho, aún hoy en día, en los manuales de referencia se hace uso de esta hipótesis para el cálculo de los axiles en pilotes de cualquier configuración con encepados rígidos (Jiménez Montoya et al., 2009). La utilización de estas metodologías simplificadas no sólo lleva a conclusiones significativamente erróneas sino que además fue una de las principales causas que explican la serie de colapsos estructurales observados en diversos eventos sísmicos y que dieron lugar, a su vez, a la desconfianza comentada anteriormente en relación con el uso de pilotes inclinados en zonas de riesgo sísmico. Entre los casos más estudiados se encuentran los fallos de: diversas pilas de puentes en el terremoto de 1964 en Alaska; las estructuras de los muelles y de soporte de las grúas de la séptima terminal del Puerto de Oakland (California) durante el terremoto de Loma Prieta en 1989; numerosos soportes de puentes en el terremoto que afectó a Costa Rica en 1991; o varios muelles del Puerto de Los Ángeles en el terremoto de Northridge en 1994, entre otros (Harn, 2004; Ravazi, Fakher y Mirghaderi, 2007; Gerolymos et al., 2008), siendo destacable el hecho de que muchos de los casos fueron asociados a fenómenos de licuefacción en algún estrato del suelo circundante o cercano.

En general, estos fallos estructurales estuvieron relacionados con la manera en que los pilotes inclinados soportaron inicialmente gran parte de las cargas horizontales (debido a su mayor rigidez), y a cómo estas cargas son derivadas al resto de la cimentación (incapaz de soportarlas adecuadamente) una vez que los pilotes inclinados fallaron. En la mayor parte de los casos, los fallos se originaron en la conexión entre el pilote y el encepado, o cerca de ésta, en el entorno de la cabeza de los pilotes. Los fallos observados fueron de todo tipo: tensión, punzonamiento, flexión, cortante y pandeo, en todo caso debidos probablemente a diseños inapropiados (Gerolymos et al., 2008), concepto que hace referencia aquí a múltiples aspectos interrelacionados entre sí. Tal y como se comentaba anteriormente, el uso de modelos simples de cálculo que no incluían la interacción entre los pilotes y el suelo podía llevar a estimaciones de esfuerzos en los pilotes muy inferiores a los reales. Si existían además terraplenes cercanos, o se trataba de terrenos estratificados, con posibilidad o no de licuefacción en alguna de sus capas, la infravaloración de los esfuerzos sería además más acusada. En cualquier caso, dichos modelos simplificados serían incapaces de estimar el verdadero comportamiento del sistema, lo que llevaría a conclusiones erróneas y a secciones y, en su caso, armaduras, inadecuadas en la cabeza de los pilotes y en su conexión con el encepado (Gerolymos et al., 2008). En muchos casos, además, la solución constructiva elegida tampoco reflejaba las hipótesis del modelo utilizado, ya que la conexión entre pilote y encepado no se ejecutaba como articulación (ni se permitía el desarrollo de rótulas plásticas) aún cuando ésta era la situación considerada en los modelos de cálculo utilizados (Kavazanjian, 2006). La ejecución deficiente parece ser una razón añadida al armado inadecuado en algunos casos (Moore, 2005). Se llega así a la conclusión de que los sistemas fallaron no necesariamente por razones intrínsecas a la configuración, sino más probablemente por un análisis y diseño incorrectos de la misma. A esta conclusión hay que añadir el hecho de que también se han documentado numerosos casos en los que este tipo de cimentaciones produjo resultados excelentes. Dos casos destacan. Uno de los pocos muros del puerto de Kobe (Japón) que resistió el terremoto de 1995 estaba cimentado con pilotes inclinados, mientras que otros muros similares cimentados sobre pilotes verticales quedaron completamente destruidos. Por otro lado, uno de las pilas del puente de Landing Road resistió desplazamientos de tierra de 2 metros, debidos a la licuefacción de una capa de terreno en el terremoto de Edgecumbe (1987. Nueva Zelanda), gracias a la existencia de pilotes inclinados que le proporcionaron la rigidez lateral suficiente (Gazetas y Mylonakis, 1998).

La serie de fallos estructurales comentados anteriormente en relación con el uso de pilotes inclinados llevó a plasmar en la mayoría de normas una actitud conservadora y a desaconsejar el uso de ese sistema en zonas con riesgo sísmico. Sin embargo, después de

estudiar y comprender las causas de aquellos desastres, parece que los pilotes inclinados han recuperado la confianza de los ingenieros y están siendo de nuevo utilizados como estrategia para soportar grandes cargas horizontales en cualquier situación. Un ejemplo es el nuevo puente de la Bahía de San Francisco, que utiliza este tipo de cimentación (figura 1) para derivar al suelo blando del lecho de la Bahía las enormes cargas horizontales que se desarrollarán en caso de terremoto (Ravazanjian, 2006; Giannakou et al. 2010).

Figura 1. Ilustración de las pilas del nuevo puente de la Bahía de San Francisco, cimentadas sobre pilotes inclinados (Caltrans, 2012)



En cualquier caso, el uso de pilotes inclinados no está exento de posibles complicaciones técnicas. Son cuatro las principales características adversas que deben ser tenidas en cuenta durante el diseño (Gazetas y Mylonakis, 1998; Gerolymos 2008).

El primer aspecto está relacionado con el tipo de esfuerzos inducidos en la cimentación cuando el suelo circundante sufre deformaciones debidas a su propio peso o a cargas verticales en la superficie. La consolidación del suelo en condiciones estáticas (bajo cargas verticales en superficie, por ejemplo) o tras un evento sísmico produce cargas puramente axiales en los pilotes, que en general no conllevan complicaciones. En el caso de pilotes inclinados, por el contrario, es evidente que dichos fenómenos producirían momentos flectores permanentes y añadidos a los ya soportados por la cimentación al derivar las cargas de la superestructura al suelo circundante. Tras un evento sísmico, estos momentos residuales pueden llegar a ser significativos en relación con los momentos flectores producidos por la carga en sí, lo que hace que, de existir, deban ser tenidos en cuenta en el diseño (Escoffier, 2012). Otros estudios muestran que, en general, la utilización de pilotes inclinados debe realizarse con mucha atención, no sólo en zonas sísmicamente activas, sino también en terrenos en desnivel o donde fenómenos de consolidación sean esperables debido a que las cargas producidas por el movimiento del terreno pueden llegar a contrarrestar los beneficios obtenidos del uso de este tipo de cimentación (Poulos, 2006). Por ejemplo, Neely (2007) documenta un caso en que las cargas axiales se multiplicaron por 4 en un pilote con 14° de inclinación en suelos en consolidación, llegándose incluso al fallo de la cimentación por esta causa. A este respecto, el uso de ángulos de inclinación pequeños (no superiores a 10°), puede ayudar a paliar estos efectos negativos.

La segunda característica a tener en cuenta está relacionada con la rigidez horizontal de los pilotes, que generará cargas sobre el encepado mayores que las generadas por los más comunes pilotes verticales, y además de signo cambiante. En este sentido, la posición relativa de la conexión del encepado con pilotes con inclinaciones opuestas es un aspecto al que prestar especial atención (Moore, 2005). A esto hay que añadir la manera en la que los pilotes inclinados pueden concentrar las cargas horizontales por su mayor rigidez y la necesidad de calcular los elementos de manera precisa para evitar fallos estructurales.

Por otro lado, y como se comentó anteriormente, el hecho de inclinar los pilotes favorece que éstos desarrollen mayores esfuerzos axiales ante cargas horizontales. Este aumento en las tensiones derivadas del esfuerzo axial produce una disminución en los momentos máximos que puede resistir la sección.

Finalmente, configuraciones no simétricas (cuando los pilotes están todos inclinados en la misma dirección o cuando sólo una fila de pilotes está inclinada, como se hace en ocasiones cuando el sentido de la carga horizontal es único) pueden dar lugar a rotaciones permanentes de la cimentación debido a la distinta rigidez de los pilotes en cada lado.

En sentido favorable, sin embargo, la utilización de pilotes inclinados puede conseguir, no sólo mayor rigidez lateral y menores desplazamientos, sino también menores aceleraciones en caso de cargas dinámicas y un coste total de construcción más reducido (debido a su mayor rigidez horizontal respecto a un pilote vertical de igual diámetro y longitud). Su uso en caso de licuefacción o con estructuras elevadas sobre la superficie del terreno puede ser especialmente beneficiosa.

A pesar de la incertidumbre existente en torno a la utilización de pilotes inclinados en el proyecto de edificaciones e infraestructuras, las normativa Española y Europea contienen únicamente referencias puntuales a esta tipología de cimentación. Como ya se ha adelantado, esta situación es debida principalmente a la falta de experiencia y de conocimientos científicos y técnicos que respalden un desarrollo normativo más profundo en este sentido, principalmente en el ámbito sísmico, razones que aconsejan profundizar en el estudio del comportamiento de este tipo de configuraciones.

2. Objetivos

Tal y como se desprende de lo expuesto en la sección anterior, existe cierto nivel de incertidumbre respecto al uso de pilotes inclinados como parte del sistema de cimentación en el proyecto de edificaciones e infraestructuras, fundamentalmente cuando el proyecto se ubica en zonas con riesgo sísmico o la estructura está sometida a cargas dinámicas. A este estado de cosas contribuye el hecho de que dicha configuración no está regulada de manera expresa en la normativa vigente. Por esta razón, se propone como objetivo de este trabajo estudiar y exponer la situación normativa actual de las cimentaciones compuestas por pilotes inclinados, y mostrar distintos resultados que ilustren su comportamiento y las posibles ventajas e inconvenientes de sus uso en proyectos de edificación y de infraestructuras. Se pretende así justificar la necesidad de continuar estudiando e investigando sobre la respuesta y características de este tipo de cimentaciones, de manera que sea posible plantear desarrollos normativos futuros, todo ello centrándose fundamentalmente en el ámbito de proyectos en ubicaciones con riesgo sísmico o ante cargas dinámicas.

3. Situación normativa

Se enumeran a continuación las normas técnicas de aplicación que afectan al proyecto y ejecución de cimentaciones profundas en proyectos de edificación o infraestructuras, prestando especial atención a la existencia o ausencia de menciones expresas al caso de pilotes inclinados.

En primer lugar podemos nombrar el Código Técnico, específicamente el Documento Básico CTE-DB-SE-C Seguridad estructural: Cimientos. Este documento dedica un capítulo al proyecto de cimentaciones profundas, especificando las tipologías y las definiciones de partida, las acciones a considerar, los métodos de análisis y dimensionado, y las condiciones constructivas y de control, todo ello complementado con el anejo F.2 donde se establecen modelos de referencia para el cálculo de cimentaciones y elementos de

contención. Aún así, no establece requerimientos o distinciones particulares en el diseño y cálculo de pilotes inclinados más allá de definir las tolerancias geométricas de ejecución respecto al ángulo de inclinación (y diferentes de las establecidas en las normas UNE-EN 1536 y UNE-EN 12699), aún cuando las metodologías de diseño y cálculo presentadas incorporan numerosas hipótesis simplificadoras y fueron derivadas principalmente para el caso de pilotes verticales. En este mismo ámbito, la norma de referencia a nivel europeo es el Eurocódigo 7: Proyecto Geotécnico. Este documento hace referencia expresa a los pilotes inclinados al detallar un grupo de situaciones en las que es necesario prestar especial atención a la determinación de las cargas transversales sobre los pilotes. Entre estas situaciones, la norma destaca los casos anteriormente comentados de pilotes inclinados en suelos susceptibles de experimentar consolidación, y de cimentaciones profundas en zonas con riesgo sísmico. Sin embargo, la norma no establece ningún tipo de metodología de cálculo ni recomendaciones al respecto.

Por otro lado hay que destacar la Instrucción de Hormigón Estructural vigente (EHE-08). Dentro de su capítulo XII relativo a elementos estructurales, el punto 58.4.1.2 del artículo 58º (elementos de cimentación) está dedicado a la comprobación y dimensionamiento de la armadura de encepados rígidos, el 58.6 a pilotes, y el 58.8 a las dimensiones y armaduras mínimas de zapatas, encepados y losas de cimentación. En el punto 58.6 relativo a pilotes, se establece que la comprobación de un pilote es análoga a la de un soporte en el que el terreno impide, al menos parcialmente, el pandeo, remitiéndose al artículo 54º para su comprobación, mientras los otros puntos se centran en el encepado, de manera que no se hace ninguna mención en absoluto al caso particular de los pilotes inclinados aún cuando, como se discutió en la introducción, el diseño de la conexión entre el pilote y el encepado tiene características particulares en este caso. En la misma línea, la norma de referencia para Proyectos de Estructuras de Hormigón a nivel Europeo, el Eurocódigo 2, tampoco contiene menciones expresas. En este ámbito existen varias normas UNE-EN relacionadas con la ejecución de cimentaciones pilotadas que sí hacen mención a pilotes inclinados, al menos en cuanto a varios aspectos constructivos. En primer lugar, la norma UNE-EN 1536:2011: "Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Pilotes perforados." es de aplicación a pilotes con ángulos de inclinación no superiores a 18º (1/3) respecto a la vertical en el caso de pilotes con entubado permanente, o 14º (1/4) en el resto de casos, tal y como queda establecido expresamente en su ámbito de aplicación. Por otro lado, la UNE-EN 14199:2006: "Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Micropilotes." incluye requisitos específicos para la correcta ejecución (no diseño o cálculo) de pilotes inclinados. Algo similar puede decirse con respecto a la UNE-EN 12699:2001: "Realización de trabajos geotécnicos especiales. Pilotes de desplazamiento", que limita la desviación en obra del eje del pilote inclinado respecto a la inclinación especificada en el proyecto.

En el caso de pilotes de acero, sería también de aplicación la Instrucción de Acero Estructural (EAE), o el Eurocódigo 3 (Proyecto de estructuras de acero), ninguno de los cuales incluye ninguna disposición específica para pilotes inclinados.

Otra norma de aplicación es la de construcción sismorresistente (NCSE-02), en cuyas reglas específicas para cimentaciones de pilotes se establecen requisitos adicionales (en caso de construcciones en zonas con riesgo sísmico), por ejemplo, respecto a la armadura de los pilotes de hormigón armado, sin hacer ningún tipo de mención expresa a la presencia de pilotes inclinados. A nivel Europeo es de aplicación el Eurocódigo 8 (Proyecto de estructuras sismorresistentes), especialmente su parte 5 (Cimentaciones, estructuras de contención y aspectos geotécnicos). El punto 5.4.2 (pilas y pilotes) de este documento indica, tal y como se comentó anteriormente: "En caso de utilizar pilotes inclinados, estos deben ser diseñados para soportar, de manera segura, tanto cargas axiales como momentos flectores", requerimiento que, a la luz de los resultados, obliga a descartar los modelos simplificados de pilotes biarticulados descritos anteriormente. A continuación, una nota adicional añade: "El

uso de pilotes inclinados no está recomendado para transmitir cargas laterales al suelo”. No queda claro aquí si el legislador se refiere exclusivamente a cargas laterales estáticas, o si está incluyendo también las cargas horizontales de origen sísmico. En cualquier caso, y dado que esa es una de sus utilidades principales, parece claro que la nota está desaconsejando su uso de manera general.

Por último, es necesario mencionar un documento que, aún sin ser de obligado cumplimiento, es de facto la guía de referencia en el proyecto y la ejecución de obras en su ámbito de aplicación: la ROM 0.5-05: “Recomendaciones geotécnicas para obras marítimas y portuarias”, editada por Puertos del Estado y el Ministerio de Fomento. Se trata del documento normativo a nivel estatal que más referencias contiene a la configuración objeto de este estudio. En primer lugar, al tratar la verificación de la seguridad frente a la rotura del terreno por tiro o empuje horizontal del pilote individual, la norma indica que “los grupos de pilotes que estén sometidos a cargas horizontales pueden tener disposiciones especiales, de manera que esas cargas sean soportadas principalmente por compresión en las cabezas de algunos pilotes inclinados”. Posteriormente, las disposiciones relativas a muelles y pantalanés de pilotes, la guía comienza indicando que “la construcción de muelles apoyados sobre cimentaciones profundas es una práctica obligada en aquellos terrenos en los que el sustrato resistente está a una profundidad excesiva para construir muelles de gravedad”, y que “pueden ser también de interés en terrenos de compacidad media, como alternativa a otras tipologías posibles”. A continuación, indica que pueden disponerse pilotes inclinados “que colaboren, con su resistencia axial, a soportar los esfuerzos horizontales”. Posteriormente, al tratar las acciones sobre los pilotes, establece que “en las disposiciones estructurales con pilotes inclinados, puede resultar que algún pilote, en alguna situación de proyecto, resulte traccionado”, en cuyo caso puede ser conveniente “disponer unas plataformas estructurales más pesadas que limiten estas tracciones”, lo que ayudaría a limitar algunos de los tipos de fallos discutidos durante la primera parte de este trabajo. En cualquier caso, los comentarios contenidos en esta norma parecen indicar que fueron realizados con la imagen habitual e intuitiva, pero no totalmente acertada, de unos pilotes inclinados que trabajan principalmente a axil.

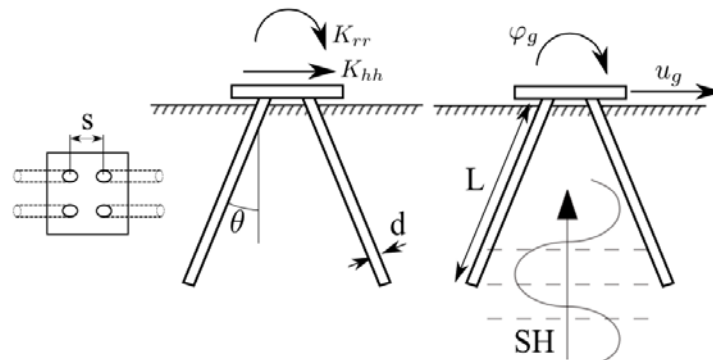
4. Metodología y Caso de Estudio

Tras realizar una introducción a la evolución y aspectos más relevantes del comportamiento de las cimentaciones profundas con pilotes inclinados, y discutir la situación normativa de este sistema de cimentación, se mostrarán en la siguiente sección distintos resultados para ilustrar las posibles ventajas e inconvenientes de su uso en proyectos de edificación y de infraestructuras en zonas con riesgo sísmico o ante cargas dinámicas. Los resultados mostrados en la sección siguiente son el fruto del trabajo realizado en los últimos años por el grupo de investigación (Maeso et al., 2005; Padrón et al., 2007, 2010, 2011, 2015; Medina et al., 2014) en la formulación, implementación y aplicación de modelos para el análisis de la respuesta dinámica de cimentaciones pilotadas. En este trabajo en particular se muestran resultados obtenidos con un modelo numérico acoplado en el dominio de la frecuencia en el que el suelo es representado como un medio viscoelástico haciendo uso del Método de los Elementos de Contorno (MEC) y los pilotes como vigas elásticas tipo Euler-Bernoulli discretizadas a través del Método de los Elementos Finitos (para más detalles de la formulación, ver p.e. Padrón et al., 2007, 2010, 2011).

La figura 2 muestra los parámetros más importantes de la configuración estudiada en este trabajo. Se trata de una cimentación profunda simétrica de 4 pilotes inclinados en la dirección de la excitación, con una separación entre pilotes s , un diámetro de pilotes d , una longitud de pilotes L , y un ángulo de inclinación respecto a la vertical θ . Se estudiará también el caso correspondiente a un solo pilote inclinado. Se mostrarán resultados relacionados con la respuesta de la cimentación ante cargas horizontales o momentos

armónicos sobre el encepado (impedancias K_{hh} y K_{rr}) así como relacionados con la respuesta de la cimentación ante ondas sísmicas de corte de incidencia vertical (SH). En este último caso, los desplazamientos horizontales y giros producidos en el encepado se representan mediante los símbolos u_g y φ_g respectivamente. En todos los casos, el coeficiente de Poisson del suelo es $\nu_s=0.4$ y se considera un coeficiente de amortiguamiento hysterético del 5% en el suelo.

Figura 2. Definición geométrica de una cimentación profunda simétrica de 4 pilotes inclinados en la dirección de la excitación. Rigideces dinámicas (derecha) e interacción cinemática ante ondas sísmica de corte de incidencia vertical (derecha).



5. Resultados

La figura 3 muestra los coeficientes de rigidez (k) y amortiguamiento (c) dinámicos, y los factores de interacción cinemática I_u e I_φ , en términos de parte real y módulo, ante ondas sísmicas de incidencia vertical de la cimentación descrita en la sección 4 para una relación entre el módulo de Young de los pilotes y del suelo de $E_p/E_s=100$, y una relación entre la separación entre ejes de pilotes y su diámetro de $s/d=5$, donde u_{go} es la magnitud del desplazamiento horizontal producido en superficie por las ondas sísmicas, y b es el semiancho del encepado. Los coeficientes se presentan como función de la frecuencia adimensional $a_o=\omega d/c_s$, donde ω representa la frecuencia circular de la carga, y c_s representa la velocidad de la onda de corte en el suelo. Las funciones se adimensionalizan utilizando magnitudes adecuadas a cada caso. La figura muestra que, como era de esperar, las rigideces horizontales k_{hh} crecen al inclinar los pilotes en la dirección de la sollicitación mientras la rigidez a giro k_{rr} decrece a bajas frecuencias. Se observa además, y como consecuencia de ello, una reducción del desplazamiento horizontal u_g generado ante ondas sísmicas de incidencia vertical junto a un aumento de la respuesta a giro φ_g . Se observa también una de las principales características de la respuesta dinámica de este tipo de cimentaciones: el fuerte acoplamiento existente entre el desplazamiento horizontal en el encepado y su giro, en este caso ante una excitación sísmica. El giro del encepado en particular no sólo aumenta significativamente al aumentar el ángulo de inclinación de los pilotes (ver gráfico inferior derecho) sino que además cambia de sentido (signo) respecto a la cimentación con pilotes exclusivamente verticales (ver gráfico inferior izquierdo).

Para ilustrar cómo el ángulo de inclinación de los pilotes afecta a los esfuerzos máximos producidos sobre una estructura ante un evento sísmico, la figura 4 muestra la respuesta espectral máxima para dos edificios pilotados diferentes, uno poco esbelto ($h/b=1$) y otro muy esbelto ($h/b=10$), donde h es la altura del edificio y b su semiancho. Los resultados fueron obtenidos según el procedimiento expuesto en Medina et al., (2015), y se muestran en términos de la fuerza sísmica efectiva máxima (Q_m) en la base de un edificio a cortante modelado como un sistema de un grado de libertad que representa el modo de vibración relevante, en función del parámetro $\sigma=c_s T/h$ que representa la relación de rigidez entre el suelo y la estructura y, por lo tanto, cuantifica la cantidad de interacción suelo-estructura

Figura 3. Coeficientes de rigidez y amortiguamiento dinámicos, y factores de interacción cinemática ante ondas sísmicas de incidencia vertical. $E_p/E_s=100$. $s/d=5$. $L/d=15$. $\rho_s/\rho_p=0.7$. (Padrón et al., 2010; Medina et al., 2014)

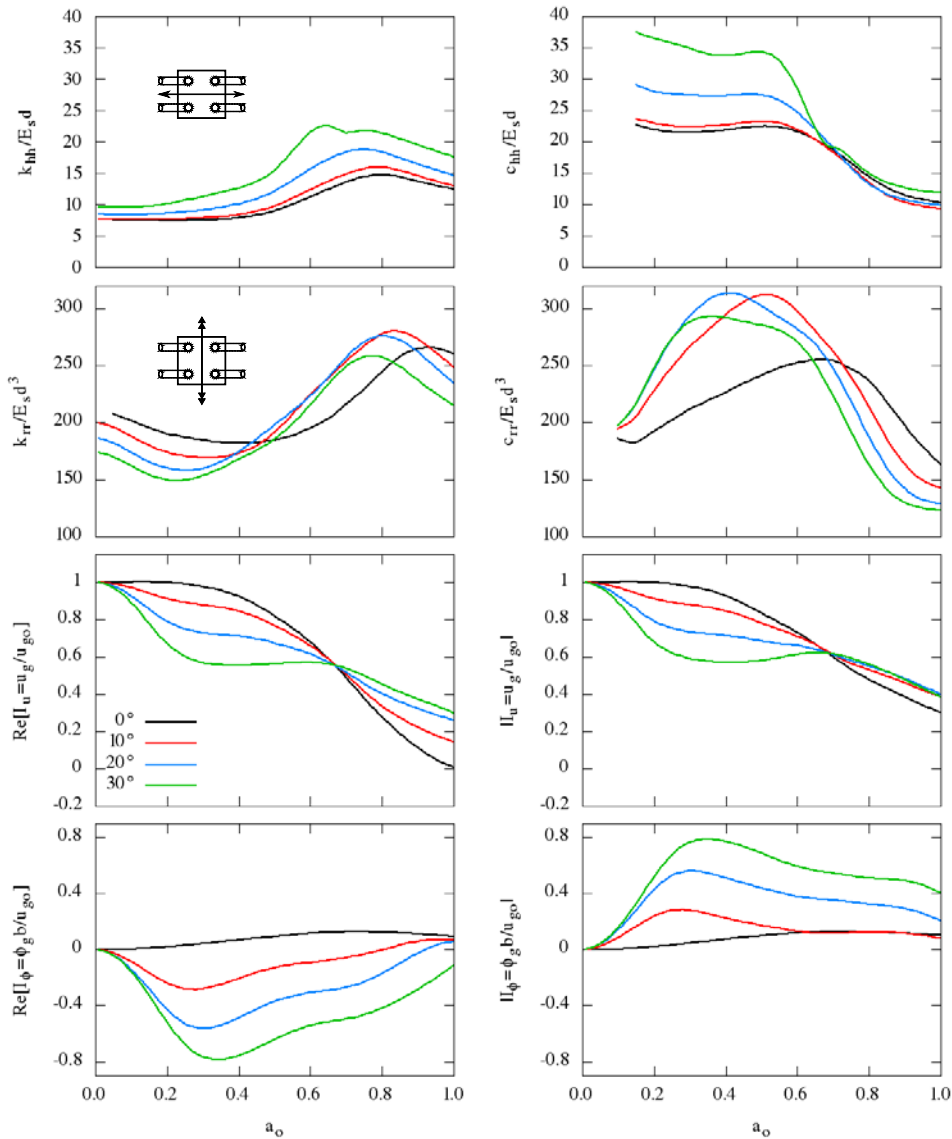
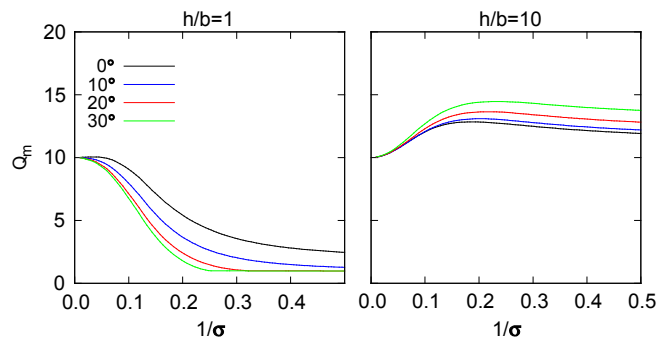


Figura 4. Respuesta estructural máxima de la superestructura en función del ángulo de inclinación de los pilotes de la cimentación ante ondas sísmicas de incidencia vertical. $s/d=7.5$, $L/d=15$, $L/b=2$, $E_p/E_s=1000$, $\rho_s/\rho_p=0.7$. (Medina et al., 2014b)



existente. Un valor de $1/\sigma$ cercano a cero implica muy poco nivel de interacción suelo-estructura, mientras que un valor alto implica un suelo muy blando en relación con la estructura y por tanto un nivel de interacción más acusado. Los resultados se corresponden con un caso con los siguientes parámetros adimensionales: $s/d=7.5$, $L/d=15$, $L/b=2$, y $E_p/E_s=1000$. Como puede verse, en el caso de edificios poco esbeltos, la inclinación de los pilotes conduce a esfuerzos sísmicos en la estructura significativamente menores, debido al incremento de la rigidez horizontal y a la reducción del input sísmico a la estructura con la inclinación de los pilotes. Los edificios altos, en cambio, al ser sensibles al comportamiento rotacional de la cimentación, experimentan esfuerzos sísmicos mayores debido a la reducción de la rigidez rotacional y el incremento del input sísmico rotacional al aumentar la inclinación de los pilotes.

Es también interesante estudiar los esfuerzos sísmicos generados en la cimentación, y cómo éstos evolucionan al modificar el ángulo de inclinación de los pilotes. Para ello, la figura 5 presenta la relación entre los momentos flectores cinemáticos (producidos por la excitación sísmica debido a la interacción pilote-suelo pero sin tener en cuenta la presencia de una superestructura) a lo largo de un pilote inclinado en relación con los sufridos por el pilote vertical en las mismas circunstancias (Padrón et al., 2015). Los resultados se presentan a lo largo de toda la profundidad de un pilote de 12 metros de largo y 0.6 metros de diámetro y, en el caso del grupo de cuatro pilotes, una separación entre centros de cabezas de pilotes adyacentes de 3 metros. Los pilotes se modelan como pilotes de hormigón armado circulares con un módulo de Young $E_p=3 \cdot 10^{10}$ Pa y una densidad $\rho_p=2500$ kg/m³. Se consideran tres tipos de suelos homogéneos con velocidades de propagación de las ondas de corte de $c_s=350$, 250 y 110 m/s respectivamente y una densidad de $\rho_s=1750$ kg/m³, lo que corresponde a relaciones de rigidez de $E_p/E_s=50$, $E_p/E_s=100$ y $E_p/E_s=500$ respectivamente. La señal sísmica se define por un acelerograma horizontal en superficie libre compatible con el espectro de respuesta elástica tipo 1 del Eurocódigo 8, considerando un suelo tipo C y un 5% de amortiguamiento, y con una aceleración pico $a_g=0.375$ g. Se asume una unión rígida entre cabeza de pilote y encepado, sin posibilidad de giro relativo. Puede verse que los momentos flectores experimentados por un pilote simple se reducen significativamente en toda su profundidad al aumentar su inclinación. Sin embargo, cuando se trata de una cimentación formada por un grupo de pilotes, esta disminución se observa únicamente a lo largo de los 2/3 más profundos del pilote, mientras los flectores en cabeza pueden llegar a aumentar en un factor de hasta 2.5. Esto es así debido a los mayores giros producidos en el encepado (tal y como se mostraba anteriormente) unido a la restricción cinemática impuesta por la presencia del encepado y la unión rígida considerada entre pilote y encepado. En este sentido, y dado que la cabeza del pilote se ha mostrado como uno de los puntos clave en el diseño, resulta interesante conocer la evolución exacta del momento en cabeza con el ángulo de inclinación. Esta variable se muestra en la figura 6 para los mismos casos mostrados en la figura anterior. Se observa que para el pilote simple, los momentos en cabeza se reducen monotónicamente con el ángulo de inclinación, mientras para el grupo de pilotes existe un ángulo específico (20° en este caso) que produce un momento máximo.

6. Conclusiones

Este trabajo ha discutido la evolución, utilidad y situación legislativa de las cimentaciones profundas con pilotes inclinados, mostrando también resultados que puedan ayudar a vislumbrar las posibles causas de fallo y algunas de las ventajas y desventajas de su utilización. Se ha puesto de manifiesto cómo la normativa técnica vigente actualmente en el territorio nacional recoge muy pocas alusiones a su uso, diseño o cálculo, a pesar de las particularidades de esta configuración (con muchas diferencias en comportamiento respecto a los pilotes verticales) y de las problemáticas detectadas a nivel internacional, principal-

Figura 5. Ratio de los momentos flectores cinemáticos a lo largo del pilote inclinado en relación con los sufridos por el pilote vertical en las mismas circunstancias. Cimentaciones sometidas a ondas sísmicas de corte de incidencia vertical. Pilote simple (arriba) y grupo de cuatro pilotes (abajo). $E_p/E_s=50$ (izquierda), 100 (centro) y 500 (derecha)

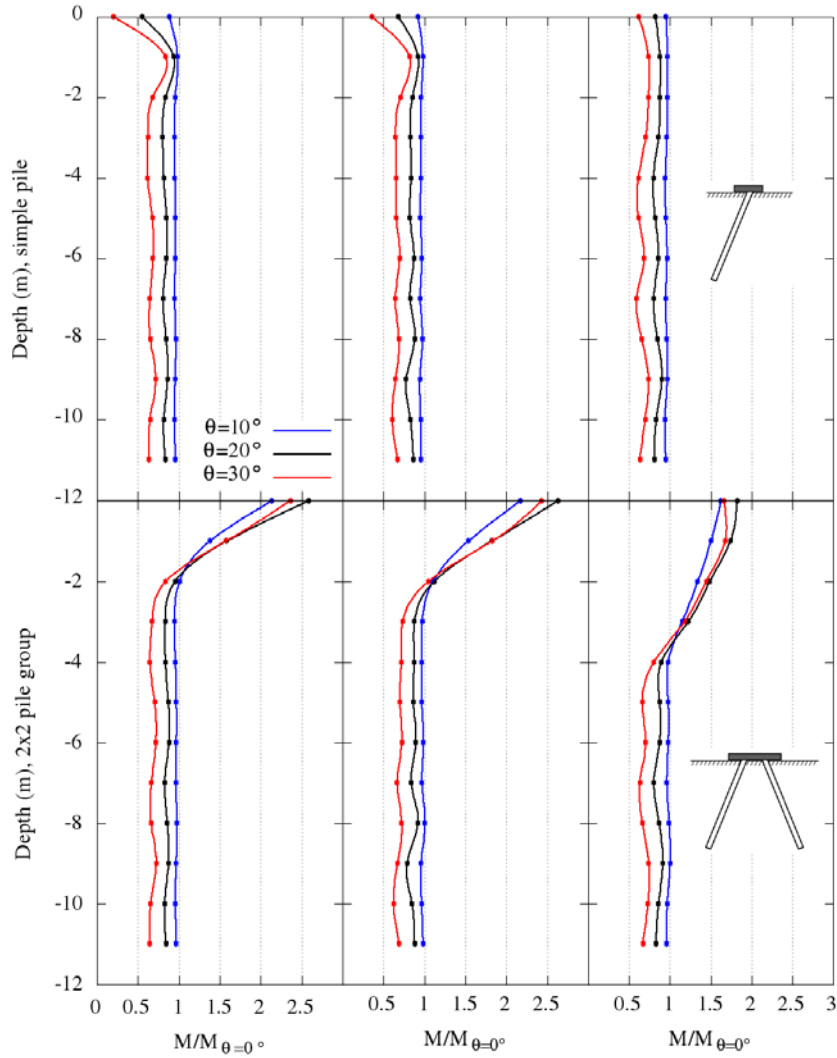
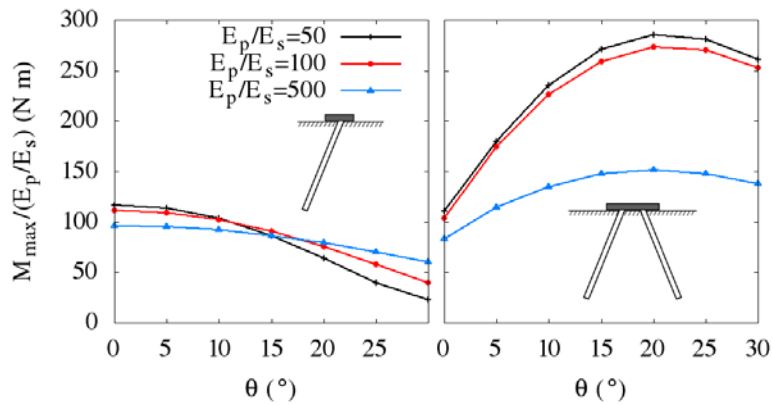


Figura 6. Evolución de los momentos flectores cinemáticos máximos en la cabeza de los pilotes en función de su ángulo de inclinación. Pilote simple (izqd.) y grupo de 4 pilotes (dcha.) (Padrón et al., 2015)



mente relacionadas con eventos sísmicos. Probablemente, este vacío normativo se debe principalmente a la falta de conocimientos técnicos y científicos que soporten un adecuado desarrollo normativo. Por tanto, se hace necesario ahondar en el estudio de este tipo de cimentación para ser capaces de explotar sus ventajas y evitar los fallos estructurales que han ensombrecido su potencial en el pasado.

Referencias

- California Department of Transportation (Caltrans) (2012). Illustration of battered piles supporting portions of the Eastern Span replacement of the San Francisco-Oakland Bay Bridge. Wikimedia Commons.
- España. Real Decreto 997/2002, de 27 de septiembre, por el que se aprueba la norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación (NCSR-02). *Boletín Oficial del Estado*, de 11 de octubre de 2002, núm 244, pp. 35898-35967.
- España. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. *Boletín Oficial del Estado*, de 28 de marzo de 2006, núm 74, pp. 11816-11931.
- España. Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08). *Boletín Oficial del Estado*, de 22 de agosto de 2008, núm 203, pp.35176-35178.
- España. Real Decreto 751/2011, de 27 de mayo, por el que se aprueba la Instrucción de Acero Estructural (EAE). *Boletín Oficial del Estado*, de 23 de junio de 2011, núm 149, pp.67148-67846.
- Escoffier, S. (2012). Experimental study of the effect of inclined pile on the seismic behavior of pile group. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 42, 275-291.
- Gazetas, G. & Mylonakis, G. (1998). Seismic soil-structure interaction: New evidence and emerging issues. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, ASCE, Geotechnical Special Publication II*, 1119-1174.
- Gerolymos, N., Giannakou, A., Anastasopoulos, I. & Gazetas, G. (2008). Evidence of beneficial role of inclined piles: Observations and summary of numerical analyses. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6, 705-22.
- Giannakou, A., Gerolymos, N., Gazetas, G. & Tazoh, T. (2010). Seismic behavior of batter piles: Elastic response. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136, 1187-1199.
- Harn, R. (2004) Displacement design of marine structures on batter piles. En *Proceeding of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada
- Jiménez Montoya, P., García Meseguer, A., Morán Cabré, F. & Arroyo Portero, J.C., (2009). Hormigón armado. 15ª Edición basada en la EHE-08. Ajustada al Código Modelo y al Eurocódigo EC-2. Editorial Gustavo Gili, S.L., Barcelona.
- Maeso, O., Aznárez, J.J. & García, F. (2005). Dynamic impedances of piles and groups of piles in saturated soils. *Computers and Structures*, 83, 769-782.
- Medina, C., Padrón, L.A., Aznárez, J.J. & Maeso, O. (2014). Kinematic interaction factors of deep foundations with inclined piles. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43, 2035-2050.

- Medina, C., Aznárez, J.J., Padrón, L.A. & Maeso, O. (2014b). Influence of pile rake angle on the seismic response of pile foundations and piled structures. In *Proceedings of the IX International Conference on Structural Dynamics, Eurodyn 2014, Porto*.
- Medina, C., Padrón, L.A., Aznárez, J.J. & Maeso, O. (2015). Influence of pile inclination angle on the dynamic properties and seismic response of piled structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 69, 196-206.
- Moore, M.A. (2005). Raked piles. Battered and misunderstood. *Structure magazine, december*, 49-53.
- Neely, W.J. (2007). Discussion of "Raked piles – virtues and Drawbaks" by Harry G. Poulos. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 133, 1474-1477.
- Padrón, L.A., Aznárez, J.J. & Maeso, O. (2007). BEM-FEM coupling model for the dynamic analysis of piles and pile groups. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 31, 473-484.
- Padrón, L.A., Aznárez, J.J., Maeso, O. & Santana, A. (2010). Dynamic stiffness of deep foundations with inclined piles. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39, 1343-1367.
- Padrón, L.A., Aznárez, J.J. & Maeso, O. (2011). 3-D boundary element – finite element method for the dynamic analysis of piled buildings. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 35, 467-477.
- Padrón, L.A., Suárez, A., Aznárez J.J. & Maeso, O. (2015). Kinematic internal forces in deep foundations with inclined piles. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*.
- Poulos, H.G. (2006). Raked piles – Virtues and drawbacks. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 132, 795-803.
- Ravanzanjan, E. (2006). A driven pile advantage: batter piles. *Pile Driver, Q4*, 21-25.
- Ravazi, S.A., Fakher, A. & Mirghaderi, S.R. (2007). An insight into the bad reputation of batter piles in seismic performance of wharves. In *Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Greece*.
- Ribera, J.E. (1926). Puentes de Fábrica y Hormigón Armado. Tomo II: Cimientos. Sucesores de Rivadeneyra, Madrid.
- ROM 0.5-05 (2005). Recomendaciones geotécnicas para para obras marítimas y portuarias. Ministerio de Fomento. Puertos del Estado.
- UNE-EN 1536:2011. Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Pilotes perforados. (2011). Asociación Española de normalización y certificación (AENOR).
- UNE-EN 1992-1-1:2013. Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. (2013). Asociación Española de normalización y certificación (AENOR).
- UNE-EN 1997-1:2010. Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. (2010). Asociación Española de normalización y certificación (AENOR).
- UNE-EN 1998-5:2011. Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 5: Cimentaciones, estructuras de contención y aspectos geotécnicos (2011). Asociación Española de normalización y certificación (AENOR).
- UNE-EN 12699:2001. Realización de trabajos geotécnicos especiales. Pilotes de desplazamiento. (2001). Asociación Española de normalización y certificación (AENOR).
- UNE-EN 14199:2006. Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Micropilotes. (2006). Asociación Española de normalización y certificación (AENOR).

