

# Trabajo Fin de Grado

## SOFTWARE DE CÁLCULO Y OPTIMIZACIÓN DE CIMENTACIONES POR PILOTES

Autor

David Ostáriz Falo

Director

José Ángel Pérez Benedicto

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia  
2016





**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA  
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

**MEMORIA**

**SOFTWARE DE CÁLCULO Y  
OPTIMIZACIÓN DE CIMENTACIONES POR  
PILOTES**

**TFG N° 423.15.5**

Autor: David Ostáriz Faló

Director: José Ángel Pérez Benedicto

Fecha: 28/6/2016



# INDICE DE CONTENIDO

<b>1. RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>2. ABSTRACT</b>	<b>2</b>
<b>3. INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
<b>4. DESARROLLO</b>	<b>5</b>
4.1. INTRODUCCIÓN-LAS CIMENTACIONES PROFUNDAS	5
4.2. CÁLCULOS ESTRUCTURALES-ANÁLISIS Y ADAPTACIÓN	11
4.2.1. <i>Normativa vigente</i>	11
4.2.2. <i>Tope estructural</i>	12
4.2.3. <i>Carga de hundimiento</i>	16
4.2.4. <i>Efecto grupo</i>	26
4.2.5. <i>Rozamiento negativo</i>	29
4.2.6. <i>Resistencia al arranque</i>	30
4.2.7. <i>Coefficientes de seguridad</i>	31
4.2.8. <i>Solicitaciones horizontales</i>	32
4.2.9. <i>Asientos</i>	33
4.2.10. <i>Cargas máxima y mínima sobre un pilote dentro de un grupo</i>	35
4.3. PARAMETRIZACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	37
4.3.1. <i>Disposiciones de pilotes en encepados</i>	38
4.3.2. <i>Determinación del volumen de encepado</i>	44
4.3.3. <i>Tipos de pilotes considerados</i>	46
4.3.4. <i>Terreno</i>	49
4.3.5. <i>Tensión efectiva del terreno</i>	50
4.3.6. <i>Peso propio del pilote</i>	50
4.3.7. <i>Resistencia por punta</i>	51
4.3.8. <i>Resistencia por fuste</i>	51
4.3.9. <i>Longitud óptima de pilote</i>	51
4.3.10. <i>Consideración de sondeos</i>	52
4.4. OPTIMIZACIÓN DE UNA CIMENTACIÓN POR PILOTES	55
4.4.1. <i>Procedimientos y algoritmos de optimización</i>	55
4.4.2. <i>El algoritmo de búsqueda por fuerza bruta y su aplicación a la optimización de arranques aislados</i>	56

## INDICES

4.4.3.	<i>Comprobaciones individuales a realizar</i>	66
4.4.4.	<i>Los algoritmos heurísticos y su aplicación a la optimización de plantas de cimentación</i>	66
4.5.	JUSTIFICACIÓN DE LA INTERFAZ CREADA	70
4.5.1.	<i>Visual Basic para aplicaciones en base Excel: Ventajas e inconvenientes</i>	70
4.5.2.	<i>Introducción de Datos y Opciones de ajuste: Flexibilidad contra Rigidez</i>	71
4.5.3.	<i>Simplificación de uso</i>	71
4.5.4.	<i>Representaciones visuales</i>	73
4.6.	EJEMPLOS PRÁCTICOS	75
4.6.1.	<i>Código técnico de edificación</i>	75
4.6.2.	<i>Guía de cimentaciones en obras de carretera</i>	77
4.6.3.	<i>Recomendaciones para obras marítimas</i>	79
5.	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>81</b>
6.	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>84</b>

# INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Trabajo de pilotes (Dirección General de Carreteras) .....	6
Ilustración 2: Carga de hundimiento (Dirección General de Carreteras) .....	16
Ilustración 3: Área de grupos de pilotes.....	27
Ilustración 4: Fricción negativa(Dirección General de Carreteras).....	29
Ilustración 5: Cargas Horizontales(Rodríguez Ortiz et al., 1989) .....	32
Ilustración 6: Asientos de grupo (Jiménez Salas et al., 1976).....	34
Ilustración 7: Cargas sobre Encepados(Dirección General de Carreteras) .....	35
Ilustración 8: Disposiciones de 3 pilotes .....	38
Ilustración 9: Disposiciones de 4 pilotes .....	39
Ilustración 10: Disposiciones de 5 pilotes (pentagonales) .....	39
Ilustración 11: Disposiciones de 6 pilotes (pentagonales) .....	40
Ilustración 12: Disposiciones de 6 pilotes (hexagonales).....	41
Ilustración 13: Disposiciones de 6 pilotes (rectangulares) .....	41
Ilustración 14: Disposiciones de 7 pilotes (hexagonales).....	42
Ilustración 15: Disposiciones de 7 pilotes (doble T).....	42
Ilustración 16: Área de los encepados .....	44
Ilustración 17: Dimensionamiento.....	52
Ilustración 18: Influencia de los buzamientos .....	53
Ilustración 19: Interpolación con dos puntos .....	54
Ilustración 20: Rectas Coste/Diámetro CPI-2.....	61
Ilustración 21: Rectas Coste/Diámetro CPI-3.....	61
Ilustración 22: Rectas coste/Diámetro CPI-4 .....	62
Ilustración 23: Rectas coste/Diámetro CPI-5 .....	62
Ilustración 24: Rectas coste/Diámetro CPI-6 .....	63
Ilustración 25: Rectas coste/Diámetro CPI-7 .....	63

## INDICES

Ilustración 26: Rectas coste/Diámetro CPI-8 .....	64
Ilustración 27: Rectas coste/Diámetro Hinca .....	64
Ilustración 28: Rectas coste/Diámetro Micropilotes .....	65
Ilustración 29: Distorsiones angulares (CTE) .....	67
Ilustración 30: Corrección de distorsiones .....	69
Ilustración 31: Cargas en arranque (CYPE Ingenieros).....	72
Ilustración 32: Concentración de elementos interactivos – arranque aislado.....	72
Ilustración 33: Concentración de los elementos interactivos-planta .....	73
Ilustración 34: Arranques en planta .....	73
Ilustración 35: Pilote en terreno .....	74



# INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Topes estructurales recomendados .....	13
Tabla 2: Reducción de espesor de armadura (Dirección General de Carreteras) 15	
Tabla 3: Influencia de la ejecución (Dirección General de Carreteras).....	15
Tabla 4: Influencia del tipo de unión (Dirección General de Carreteras) .....	15
Tabla 5: Coeficiente corrector por hinca.....	20
Tabla 6: Tipos de Rocas (Dirección General de Carreteras) .....	21
Tabla 7: Grados de meteorización (Dirección General de Carreteras).....	21
Tabla 8: Factor de alteración (Puertos del Estado) .....	24
Tabla 9: Grados de Meteorización (Puertos del Estado).....	24
Tabla 10: Factores de seguridad micropilotes (Dirección General de Carreteras) .....	25
Tabla 11: Resistencias unitarias en rocas (Dirección General de Carreteras).....	26
Tabla 12: Coeficientes de seguridad frente a hundimiento.....	31
Tabla 13: Coordenadas en disposiciones de 3 pilotes.....	38
Tabla 14: Coordenadas en disposiciones de 4 pilotes.....	39
Tabla 15 : Coordenadas en disposiciones de 5 pilotes (pentagonales).....	39
Tabla 16: Disposiciones de 5 pilotes (cuadradas) .....	40
Tabla 17: Coordenadas en disposiciones de 5 pilotes (cuadradas) .....	40
Tabla 18:Coordenadas en disposiciones de 6 pilotes (pentagonales).....	40
Tabla 19: Coordenadas en disposiciones de 6 pilotes (hexagonales).....	41
Tabla 20: Coordenadas en disposiciones de 6 pilotes (rectangulares) .....	41
Tabla 21: Coordenadas en disposiciones de 7 pilotes (hexagonales).....	42
Tabla 22: Coordenadas en disposiciones de t pilotes (doble T).....	42
Tabla 23: Matriz resumen de disposiciones .....	43
Tabla 24: Perfiles metálicos comerciales HP (Arcelormittal) .....	46

INDICES

Tabla 25: Armaduras tubulares (Geotecnia del Sur) .....57

## 1. RESUMEN

El presente Trabajo consiste en el desarrollo de una sencilla aplicación informática que permita el cálculo de pilotajes en base a los criterios establecidos en las diferentes instrucciones nacionales que rigen esta tipología de cimentación y su optimización mediante un estudio de costes que permita una estimación lo más cercana posible a la realidad. Se han excluido del trabajo los cálculos estructurales relativos a elementos superficiales de la planta, tales como encepados, vigas de atado o centrado y losas de cimentación.

Se han estudiado los documentos de referencia para determinar las variables que se emplean en los cálculos, además de las geometrías más usuales, y así parametrizar el problema en función de las mismas. Además se han consultado diversos catálogos y bases de precios para poder estimar costes de los materiales y de la ejecución de las diferentes variedades de pilotes que hay actualmente en el mercado.

Posteriormente se ha redactado el código necesario para realizar los cálculos estructurales relativos estrictamente al pilotaje a la par que se desarrollaba la interfaz, procurando en todo momento que la aplicación respondiese a las necesidades del usuario, y facilitase su tarea lo máximo posible.

A continuación, y en función de los mismos parámetros base que para los cálculos estructurales, se ha definido la función de coste de ejecución que será la que determine la solución óptima a la situación que se plantee.

Una vez desarrollados los cálculos estructurales se han examinado diversos procedimientos de optimización combinatoria y heurística, con objeto de seleccionar los más adecuados para afrontar el problema. Una vez escogidos se han adaptado y se ha implementado en ellos los diversos códigos de cálculo creados.

Por último se ha realizado una reflexión sobre posibles vías de futuro desarrollo para la aplicación, tanto de la inclusión de nuevas prestaciones como de mejora de las ya creadas.

Palabras clave: Cimentaciones, Pilotes, Optimización, Programación, Software

Abstract

## 2. ABSTRACT

This thesis consists on the development of a simple software application that allows the calculation of pilings on the basis of the criteria laid down in the various national codes governing this type of foundation and its optimization through a cost study that allows an estimate as close as possible to reality. Structural calculations for surface elements of the foundation, such as pile caps, tie or bracing beams and foundation slabs have been excluded.

The variables used in the calculations, in addition to the most common geometries have been defined through a study of the reference documents, in order to parameterize the problem depending on them. Furthermore, several catalogues and prices bases have been consulted to estimate the cost of materials and the variety of piles that are currently on the market.

Subsequently the code required to perform the structural calculations related to piloting has been written during the development of the interface, ensuring at all time that the application would respond to user needs, and facilitate its task as much as possible.

Then, based on the same basic parameters used for structural calculations has been defined the function of execution cost that will be the one that will determine the solution to every situation arisen.

Once developed the structural calculations, various combinatorial and heuristic optimization procedures have been examined in order to select the most appropriate to address the problem. Once chosen they have been adapted the calculations codes created previously have been implemented in them

Finally a reflection has been made on possible ways forward for the implementation of both the inclusion of new features and the improvement of the ones already developed.

Keywords: Foundations, Piling, Optimization, Programming, Software

### 3. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas la explosión de la tecnología informática ha transformado todos los sectores de la sociedad, incluido el de la construcción. Los programas de diseño y cálculo han facilitado la tarea de arquitectos e ingenieros, reduciendo tiempo, costes y aportando resultados más homogéneos y fiables.

Hoy en día pueden verse gran variedad de programas que se adaptan a las necesidades de los profesionales, cada vez más precisos, y que permiten una resolución prácticamente inmediata del problema que se plantea, ya sea en cálculos de movimiento de tierras, de redes de tuberías, de presupuestos, etc.

Dentro de la categoría de la ingeniería en la que pueden destacarse mayor variedad de programas existentes está el cálculo estructural, dada la gran variedad de tipologías, materiales y los diferentes métodos de cálculo que existen. Dentro de esta categoría pueden destacarse SAP2000, CYPECAD y CIVILCAD2000, pero la lista podría seguir indefinidamente con aplicaciones como ETABS, Tricalc, Powerframe, Autocad Bridge Builder, STAAD.Pro, TEKLA Steel Structures y Solidworks, entre muchas otras.

Sin embargo, el cálculo de las cimentaciones profundas no ha sido abordado más que por unas pocas casas comerciales. Entre ellas probablemente el que lo haya desarrollado más sea la firma CIVILCAD2000. Sin embargo, al ser un programa que solo se aplica al sector de la ingeniería civil ha pasado relativamente desapercibido, tanto que hasta una consultoría lanza al mercado este mismo año un programa que aborda este mismo tema, planteándolo como el primer programa para calcular pilotes según la normativa española. En el ámbito internacional destaca, además, el software GEO5, que permite el cálculo de pilotes aislados y grupos de pilotes por métodos de elementos finitos, pero que no se ajustan todo lo deseable a los modelos planteados en las instrucciones nacionales.

No hay un criterio específico para determinar si un programa es mejor o peor que otro, dado que eso debe ser juzgado por cada usuario. Algunos sostienen que la variedad de cálculos que permita realizar y la precisión de los mismos es el factor determinante. No obstante, y dado que los cálculos que realizan la mayoría de programas de una misma temática siguen procedimientos similares, el aspecto que cobra cada vez más importancia es el de la facilidad y flexibilidad uso. Esto es, optar por

## Introducción

estructuras intuitivas y visuales e introducir múltiples opciones, tanto de cálculos como de presentación y edición de resultados.

En vista de todo lo anteriormente mencionado, este Trabajo pretende concluir con la creación de un programa que realice los cálculos relativos a las cimentaciones profundas con rigurosidad, supliendo el vacío relativo que existe actualmente y obviando cualquier aspecto que ya se encuentre cubierto por algún otro software comercial existente.

Aunque el objetivo principal es crear un programa que realice los cálculos con precisión, éste deberá ser a su vez sea intuitivo y cómodo de usar, de tal forma que los usuarios con formación técnica en la materia puedan sacarle el mayor partido con un periodo de aprendizaje lo más breve posible.

El Trabajo englobará, por una parte, el análisis de las guías, instrucciones, normativas y manuales que rigen las cimentaciones por pilotes, para la definición de los cálculos estructurales, y de catálogos y bases de precios, para la adaptación a su uso comercial y la definición de los criterios de optimización. Una vez definidos, se adaptarán al lenguaje de programación.

Por otra parte, se desarrollará la interfaz de uso, procurando que sea lo más cómoda posible de manejar y que sea acorde a las necesidades del usuario.

## 4. DESARROLLO

### 4.1. INTRODUCCIÓN-LAS CIMENTACIONES PROFUNDAS

Se considera que una cimentación es profunda si su extremo inferior, en el terreno, está a una profundidad superior a 8 veces su diámetro o ancho.

La presencia de espesores grandes de suelos blandos próximos a la superficie es una de las razones principales para proyectar una cimentación profunda, pero, además, existen otros motivos que pueden hacerla más recomendable. La previsión de posibles socavaciones en cauces fluviales o en zonas costeras o la presencia de heterogeneidades importantes (cavidades cársticas, por ejemplo) son también motivos frecuentes para elegir una cimentación profunda.

El elemento esencial de la cimentación profunda es el pilote. Éste puede ser de naturaleza y formas muy variadas. En general siempre será un elemento aproximadamente cilíndrico o prismático, cuya longitud es mucho mayor (al menos cinco veces) que la dimensión transversal media.

Las cimentaciones profundas se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- **Pilote aislado:** También denominados pila-pilote. Suelen ser elementos de gran capacidad portante que prolongan la estructura de la pila de apoyo dentro del terreno, hasta la profundidad requerida, estando lo suficientemente alejado de otros pilotes como para que no tenga interacción geotécnica con ellos.
- **Grupo de pilotes:** son aquellos que por su proximidad interaccionan entre sí o están unidos mediante elementos estructurales lo suficientemente rígidos, como para que trabajen conjuntamente.
- **Zonas pilotadas:** son aquellas en las que los pilotes están dispuestos con el fin de reducir asientos o mejorar la seguridad frente a hundimiento de las cimentaciones. Suelen ser pilotes de escasa capacidad portante individual y estar regularmente espaciados o situados en puntos estratégicos

## Desarrollo

- **Micropilotes:** son aquellos compuestos por una armadura metálica formada por tubos, barras o perfiles introducidos dentro de un taladro de pequeño diámetro, pudiendo estar o no inyectados con lechada de mortero a presión más o menos elevada.

En cuanto a la forma de trabajo, los pilotes se clasifican en:

- **Pilotes por fuste:** en aquellos terrenos en los que al no existir un nivel claramente más resistente, al que transmitir la carga del pilotaje, éste transmitirá su carga al terreno fundamentalmente a través del fuste. Se suelen denominar pilotes flotantes.
- **Pilotes por punta:** en aquellos terrenos en los que al existir, a cierta profundidad, un estrato claramente más resistente, las cargas del pilotaje se transmitirán fundamentalmente por punta. Se suelen denominar pilotes columna.

Entre estas dos situaciones pueden darse a su vez otras intermedias.

### **Ilustración 1: Trabajo de pilotes (Dirección General de Carreteras)**

De forma general, atendiendo al modo de colocar los pilotes dentro del terreno, se considerarán los siguientes:

- **Pilotes prefabricados hincados:** la característica fundamental de estos pilotes estriba en el desplazamiento del terreno que su ejecución puede inducir, ya que el pilote se introduce en el terreno sin hacer excavaciones previas que faciliten su alojamiento en el terreno.



- **Pilotes hormigonados "in situ"**: son aquellos que se ejecutan en excavaciones previas realizadas en el terreno. Se diferencian los siguientes tipos, según el Código Técnico de Edificación:
  - **Pilotes de desplazamiento con azuche (CPI-2)**: La hinca se hace mediante golpeo con maza en la parte superior de la camisa, hormigonando posteriormente y recuperando la camisa, de manera que quede un mín.  $2 \varnothing$  de hormigón dentro de ella. Indicados para trabajar en punta en terrenos duros, son de compleja ejecución y poco utilizados en la actualidad.
  - **Pilotes de desplazamiento con tapón de gravas (CPI-3)**: El golpeo se realiza con una sobre un tapón de gravas, arena u hormigón introducido previamente en la entubación, dispuesto en tongadas pequeñas y compactadas, hasta obtener un espesor  $3\varnothing$ , hormigonando posteriormente y recuperando la camisa, de manera que quede un mínimo de dos  $\varnothing$  de hormigón dentro de ella. Indicados para trabajar por fuste en terrenos granulares. Poco utilizados en la actualidad.
  - **Pilotes de extracción con entubación recuperable (CPI-4)**: Se introducen en el terreno mediante la extracción de tierras. La entubación o camisa, se introducirá acompañando a la excavación y por delante de ésta. Indicados para trabajar por punta en roca o por fuste en terrenos coherentes y consistencia firme. Son pilotes para ejecutarse, en terrenos que se desmoronan durante la excavación, de manera discontinua perforándose mientras se introduce la camisa, posteriormente se coloca la armadura, se hormigona con tubo tremie y posteriormente se extrae la camisa recuperable.
  - **Pilotes de extracción con camisa perdida (CPI-5)**: Pilotes con extracción de tierras, de ejecución similar al CPI-4 y cuya diferencia estriba en que no se recupera la entubación o camisa, al objeto de garantizar la protección del hormigón, tanto en el proceso de endurecimiento como a largo plazo frente a la agresividad de determinados suelos o aguas. Recomendado para pilotes que trabajen por punta en suelos duros o rocosos pero que se encuentran

## Desarrollo

- situados por debajo de suelos agresivos o de suelos que se desmoronan.
- **Pilotes de extracción sin entubación con lodos tixotrópicos (CPI-6):** Pilotes con extracción de tierras, en cuya ejecución se utilizan lodos tixotrópicos para la contención de las paredes de la excavación. Una vez colocada la armadura se procede al hormigonado, realizándolo con tubo desde el fondo de la perforación de manera que el hormigón desplace hacia la parte superior del pilote los lodos.
  - **Pilotes barrenados sin entubación (CPI-7):** Pilotes en cuya ejecución se realiza la perforación y extracción de tierras mediante barrenado. La colocación de la armadura se efectuará con especial cuidado para evitar el desmoronamiento de las tierras, y posteriormente se hormigonará mediante tubo tremie desde el fondo de la excavación. Recomendados para trabajar por punta en terreno duro, o por fuste en terrenos coherentes en los que no se produzcan desprendimientos.
  - **Pilotes barrenados, hormigonados por el tubo central de la barrena (CPI-8):** Pilotes con excavación y extracción de tierras mediante barrena. Una vez introducida la barrena hasta la profundidad adecuada, se procederá, de forma simultánea a la extracción de la misma y al hormigonado por el tubo central de la barrena (con extracción de la barrena se produce la extracción de tierras). Con posterioridad, una vez completado el hormigonado se procederá a la colocación de las armaduras (Fotog.3.3). Se utiliza trabajando por punta apoyado en capas duras del terreno, aunque también se puede utilizar trabajando por punta y fuste en terrenos coherentes y granulares de alguna consistencia
  - **Pilotes de desplazamiento por rotación.** Permiten mediante la aplicación de rotación y empuje a la cabeza en la fase de perforación, y rotación y tiro en la fase de extracción, la instalación de pilotes con total ausencia de vibraciones y produciendo un desplazamiento lateral del terreno que lo compacta y evita la extracción de detritus. Por encima del diámetro máximo de la cabeza, unas hélices horizontales y la inclinación adecuada del ángulo superior produ-

cen un segundo desplazamiento del terreno durante la secuencia de extracción y la fase de hormigonado. En esta fase, la presión controlada de inyección de hormigón a través de la varilla del tubo central induce un tercer estado de desplazamiento, asegurando una perfecta adherencia del pilote con el terreno.

Y según el Pliego de Prescripciones Técnicas para Obras de Carretera y Puentes:

- **Pilotes con entubación recuperable:** La entubación se extrae a medida que se hormigona el pilote, y es siempre de acero.
- **Pilotes con entubación perdida:** La entubación constituye la protección exterior o forro del pilote.
- **Pilotes perforados con lodos bentoníticos:** Son los pilotes en los que se utiliza, como contención de las paredes de perforación, lodo bentonítico.
- **Pilotes perforados sin sostenimiento:** Pilotes en los que no se utiliza ningún sistema de contención de las paredes de perforación por permitirlo el terreno, sin que se prevea presencia de agua.
- **Pilotes perforados con barrena continua:** Pilotes perforados con una hélice continua de fuste hueco, a través del cual se procede al hormigonado a medida que se extrae la hélice.

También podrán ejecutarse pilotes de carácter intermedio entre los dos anteriores, tales como los hincados en preexcavaciones parciales de menor longitud y mayor diámetro que el pilote.

El material que constituye el pilote tiene importancia al evaluar su capacidad de soporte. Por ello conviene distinguir los distintos materiales que se usan normalmente, que son los siguientes:

- **Hormigón "in situ":** Son los que se utilizan con más frecuencia en España. Normalmente se realizan mediante perforación o excavación previa, aunque también pueden ejecutarse mediante desplazamiento del terreno o con técnicas mixtas (excavación y desplazamiento parciales).
- **Hormigón prefabricado:** Puede ser hormigón armado (hormigones de alta resistencia) u hormigón pretensado. Normalmente se utilizan para fabricar pilotes hincados.

## Desarrollo

- **Acero:** Suelen utilizarse secciones tubulares o perfiles en doble U, o en H. Los pilotes de acero se suelen hincar con azuches (protecciones en la punta).
- **Madera:** Es una solución común para pilotar zonas blandas amplias, para apoyo de estructuras con losa o terraplenes. El tipo de madera más usado es el tronco de eucalipto.

Pueden usarse pilotes mixtos, particularmente cabe destacar los pilotes de acero tubular rodeados y rellenos de mortero, lo que resulta una práctica habitual en los micropilotes.

## 4.2. CÁLCULOS ESTRUCTURALES-ANÁLISIS Y ADAPTACIÓN

En este apartado se van a presentar los aspectos relativos a cálculos estructurales de las normativas vigentes contemplados, y como se han adaptado éstos para introducirlos en la infraestructura del programa.

### 4.2.1. *Normativa vigente*

El proyecto de estructuras de cimentación se encuentra contemplado en una serie de documentos publicados por organismos oficiales. En la mayoría de ellos es usual encontrar un capítulo relativo a las cimentaciones profundas. A continuación se exponen los principales que rigen actualmente a nivel nacional esta tipología.

#### **Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera**

La Guía de cimentaciones en obras de carretera se elabora en 2002 por la Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras con la colaboración del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX y de un grupo numeroso de expertos nacionales de geotecnia y estructuras, y describe las reglas de buena práctica que han de aplicarse en los proyectos, en la construcción y en la conservación de las obras de cimentación en carreteras. Es revisada y editada posteriormente, siendo la última versión publicada la de 2009.

#### **Código Técnico de la Edificación: Documento Básico-Seguridad Estructural-Cimientos**

La primera versión del Código Técnico de la Edificación se publica en 2006, habiendo sido elaborado por la Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo en colaboración con el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Es el marco normativo que establece las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad establecidos en la Ley de Ordenación de la Edificación. Dentro del mismo, el Documento Básico de Seguridad Estructural: Cimientos contempla todo lo relativo a la seguridad estructural, capacidad portante y aptitud al servicio, de los elementos de cimentación y, en su caso, de con-

## Desarrollo

tención de todo tipo de edificios. La última versión de este documento se publica en 2007, habiéndose realizado una corrección de errores en el año 2008.

### **Recomendaciones Geotécnicas para el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias**

El ámbito de aplicación de las Recomendaciones Geotécnicas para el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias, redactada por un amplio grupo de expertos bajo la dirección de Puertos del Estado, se extiende a todas las obras marítimas y portuarias cualquiera que sea su clase o destino, así como los materiales y elementos empleados en su construcción, considerándose como Obras Marítimas y Portuarias aquellas estructuras, elementos estructurales o movimientos de tierra ubicados en zonas portuarias marítimas o fluviales, o en cualquier otra pertenencia del dominio público marítimo-terrestre. La primera edición de la ROM 05.05, que sustituye a la 05.94, se publica en 2005.

### **Guía para el Proyecto y Ejecución de Micropilotes en Obras de Carretera**

Esta Guía se elabora por la Dirección General de Carreteras en colaboración con el Comité Técnico de la Asociación de Empresas de la Tecnología del Suelo y del Sub-suelo. Contempla las principales cuestiones a considerar durante el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera, en sus principales aplicaciones. Su primera y única versión es publicada en 2005.

#### **4.2.2. *Tope estructural***

El tope estructural es la carga vertical de servicio máxima a la que se puede cargar un pilote. Dependerá de:

- La sección transversal del pilote
- El tipo de material del pilote
- El procedimiento de ejecución
- El terreno

Aunque como tope estructural se entiende la fuerza máxima que soporta el pilote, es más razonable expresarlo como la tensión máxima que es capaz de soportar el material, de manera que se homogeneiza el valor y se puede obtener la carga simplemente multiplicando por la sección transversal neta del pilote.

Este es el concepto en que hay una mayor coincidencia de las distintas normativas, habiendo variaciones mínimas entre sus recomendaciones. A continuación se expone una tabla resumen de los topes que proponen para las diferentes situaciones que puedan darse.

		Valores de $\sigma$ (MPa)		
		CTE- SE-C	GCOC	ROM 0.5-05
Hincados	Hormigón pretensado	$0,3 \cdot (f_{ck} - 0,9 \cdot f_p)$	$0,3 \cdot (f_{ck} - 0,9 \cdot f_p)$	$0,3 \cdot (f_{ck} - 0,9 \cdot f_p)$
	Hormigón armado	$0,3 \cdot f_{ck}$	$0,3 \cdot f_{ck}$	$0,3 \cdot f_{ck}$
	Metálicos	$0,3 \cdot f_{yk}$	$0,33 \cdot f_{yk}$	$0,33 \cdot f_{yk}$
	Madera	5	5	5

		Valores de $\sigma$ (MPa)					
		Suelo firme			Roca		
		CTE- SE-C	GCOC	ROM 0.5-05	CTE- SE-C	GCOC	ROM 0.5-05
Perforados	Entubados	5	5	5	6	6	6
	Con lodos	4	4	4	5	5	5
	En seco	4	4	4	5	5	5
	Barrenado sin control de parámetros	3,5	4	4	-	-	-
	Barrenado con control de parámetros	4	4	4	-	-	-

Un control de ejecución intenso permite el empleo de topes estructurales superiores en pilotes perforados (25% según CTE y 20% según GCOC) o empotrados en roca (20% según GCOC y ROM)

**Tabla 1: Topes estructurales recomendados**

El tope estructural puede sustituir a la comprobación de capacidad portante en la gran mayoría de las situaciones, dado que proporciona un valor bastante menor que las resistencias de cálculo. Esta minoración tan acusada responde a la situación de contacto directo con el terreno que experimenta esta tipología de cimentación, y que puede acarrear casos de deterioro de los materiales, reduciendo su sección efectiva. En el caso de pilotes in situ existe además la posibilidad de que el hormigón se contamine al mezclarse con terreno que se desprenda de las paredes de la perforación, perjudicando su resistencia. Para este caso podría incluso considerarse que los pilotes de mayor diámetro deberían experimentar reducciones mayores de la resistencia a consi-

## Desarrollo

derar. A pesar de esto, y por simplificar, se ha optado por mantener el tope estructural independientemente del valor que tome el diámetro<sup>1</sup>.

La Guía para el Proyecto de Micropilotes, sin embargo, no contempla esta consideración, con lo que siempre será necesario calcular su resistencia estructural en función de las características de la lechada o el mortero empleado, la armadura tubular y los refuerzos<sup>2</sup>.

$$N_{c,Rd} = (0,85 \cdot A_c \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{sd} + A_a \cdot f_{yd}) \cdot \frac{R}{1,2 \cdot F_e}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,5}$$

$$f_{sd} = \frac{f_{sk}}{1,15} \leq 400 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = \frac{f_y}{1,1} \leq 400 \text{ MPa}$$

$$A_c = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 - A_{a,real} - A_s$$

$$A_a = \frac{\pi}{4} [(d_e - 2r_e)^2 - d_i^2] \cdot F_{u,c}$$

$$A_{a,real} = \frac{\pi}{4} [d_e^2 - d_i^2] \cdot F_{u,c}$$

$$A_s = \sum n_d \frac{\pi}{4} \cdot d^2$$

Donde

**N<sub>c,Rd</sub>**: Resistencia estructural del micropilote

**A<sub>c</sub>**: área de cálculo de la lechada/mortero

**A<sub>a</sub>**: área de cálculo de la armadura tubular

**A<sub>s</sub>**: área de cálculo de las barras de refuerzo

**F<sub>ck</sub>, F<sub>cd</sub>**: resistencias característica y de cálculo de la inyección

**F<sub>sk</sub>, F<sub>sd</sub>**: límites elástico y de cálculo del acero corrugado

**F<sub>yk</sub>, f<sub>yd</sub>**: límites elástico y de cálculo de la armadura tubular

**D**: diámetro exterior del pilote

**D<sub>e</sub>**: diámetro exterior de la armadura tubular

**R<sub>e</sub>**: reducción de espesor

<sup>1</sup> Véase Anexo I: Apartado 3.11

<sup>2</sup> Véase Anexo I: Apartado 3.12



TIPO DE TERRENO	VIDA ÚTIL REQUERIDA AL MICROPILOTE <sup>3</sup> (años)				
	5	25	50	75	100
Suelos naturales sin alterar	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Suelos naturales contaminados o suelos industriales	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Suelos naturales agresivos (turberas, ciénagas, etc.)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Rellenos no agresivos sin compactar <sup>2</sup>	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Rellenos agresivos sin compactar (cenizas, escorias, etc.) <sup>2</sup>	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75

**Tabla 2: Reducción de espesor de armadura (Dirección General de Carreteras)**

**D<sub>i</sub>**: diámetro interior de la armadura tubular

**R**: factor empírico de pandeo

**F<sub>e</sub>**: coeficiente de influencia del tipo de ejecución

TIPO DE TERRENO Y DE PERFORACIÓN	F <sub>e</sub>
Terreno con nivel freático por encima de la punta del micropilote y perforación sin revestir, sin empleo de lodos	1,50
Terreno con nivel freático permanentemente bajo la punta del micropilote y perforación sin revestir, sin empleo de lodos	1,30
Cualquier tipo de terreno perforado con lodos	1,15
Cualquier tipo de terreno perforado al amparo de revestimiento recuperable	1,05
Micropilote con tubería de revestimiento dejada «in situ» de forma permanente (camisa perdida)	1,00

**Tabla 3: Influencia de la ejecución (Dirección General de Carreteras)**

**F<sub>u,c</sub>**: coeficiente de minoración del área de la armadura tubular

TIPO DE UNIÓN	F <sub>u,c</sub>
Mediante manguitos exteriores doblemente roscados, sin disminución de sección	1,0
De rosca machihembrada con sección ensanchada	
De rosca machihembrada, sin sección ensanchada y con contacto a tope en ambos extremos	
Otras uniones diseñadas específicamente para no sufrir pérdidas de resistencia	
Resto de casos	0,5

**Tabla 4: Influencia del tipo de unión (Dirección General de Carreteras)**

### 4.2.3. *Carga de hundimiento*

La carga de hundimiento es la carga máxima transmitida por un pilote que puede soportar el terreno, y es la suma de las resistencias por punta y por fuste.

#### **Ilustración 2: Carga de hundimiento (Dirección General de Carreteras)**

La parte de la carga de hundimiento que corresponde a la punta, se deducirá de las características del terreno en la zona de influencia de la punta, que se divide en las zonas activa, que queda por debajo del nivel de la punta, y pasiva, que queda por encima. Los tres documentos coinciden en que estas zonas han de medir 3 y 6 diámetros respectivamente, salvo para el caso de suelos cohesivos, en el que la ROM 05 05 propone una reducción hasta los 2 y 4 diámetros respectivamente.

Dado que estimar el parámetro resistente medio en la zona de influencia, en caso de situarse esta cercana al límite entre dos estratos, podría suponer una sobreestimación del mismo se va a optar por forzar que la zona de influencia se sitúe íntegramente dentro de un mismo estrato. Esta solución se inclina hacia la seguridad y es usualmente empleada debido a la reducción y simplificación de cálculos que implica.

Ha de considerarse además que en los casos en que los pilotes se empotren en estratos rocosos no debe contemplarse la resistencia por fuste en suelos, al ser estos

más deformables. Por la misma razón en algunos casos no interesará considerar la resistencia por punta en suelos, y así diseñar el pilote como puramente flotante.

El programa efectuará los cálculos relativos a la carga de hundimiento mediante la solución analítica expuesta en cada norma, que resulta la opción más adecuada para su empleo en este caso, por presentar formulación relativamente similar en todos los documentos de referencia. En caso de que el proyectista prefiera emplear datos de los ensayos de penetración podrá emplear las tablas de equivalencias que incluyen las normativas y así obtener los parámetros para las fórmulas analíticas.

## CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN

### Suelo Granular

#### Resistencia unitaria por punta

$$q_p = f_p \cdot \sigma'_v \cdot N_q \leq 20 \text{ MPa}$$

$$N_q = \frac{1 + \operatorname{sen}(\varphi)}{1 - \operatorname{sen}(\varphi)} \cdot e^{\pi \cdot \operatorname{tg}(\varphi)}$$

#### Resistencia unitaria por fuste

$$\tau_f = K_f \cdot \sigma'_v \cdot f \cdot \operatorname{tg}(\varphi) \leq 120 \text{ KPa}$$

$f_p$  : 3 para pilotes hincados, 2.5 para perforados

$\sigma'_v$  : tensión vertical efectiva del terreno natural al nivel de punta

$\varphi$  : ángulo de rozamiento interno del terreno

$K_f$  : 1 para pilotes hincados, 0,75 para pilotes perforados

$f$  : 1 para pilotes hormigonados in situ o de madera, 0.9 para pilotes de hormigón prefabricados y 0,8 para pilotes de acero

### Suelo cohesivo

#### Resistencia unitaria por punta (corto plazo)

$$q_p = 9 \cdot c_u$$

#### Resistencia unitaria por fuste (corto plazo)

$$\tau_f = \frac{100 \cdot c_u}{100 + c_u}$$

Cu y  $\tau_f$  en KPa

Cu : la resistencia al corte sin drenaje del suelo cohesivo, teniendo en cuenta la presión de confinamiento al nivel de la punta

En pilotes con fuste de acero en suelos finos, el valor de  $\tau_f$  a corto plazo se afectará por un coeficiente reductor de 0,8

Para determinar la resistencia de hundimiento a largo plazo, se emplearán las fórmulas para suelos granulares, despreciando el valor de la cohesión. En tal caso, la resistencia unitaria por fuste no podrá superar los 0,1 MPa.

### Roca

#### Resistencia unitaria por punta

$$q_{p,d} = \frac{3 + \frac{s}{D}}{10 \sqrt{1 + 300 \frac{a}{s}}} \cdot q_u \cdot D \cdot d_f$$

#### Resistencia unitaria por fuste

$$\tau_{f,d} = 0,2 \cdot \sqrt{q_u}$$

qu y  $\tau_f$  en MPa

S : espaciamiento de discontinuidades >300 mm

A : apertura de discontinuidades  $a/s < 0,02$

D : diámetro equivalente en área del pilote

Df:  $1+0,4 \cdot L_r/D < 3$

Lr: longitud de empotramiento

Se considera que las fórmulas ya lleva aplicado el coeficiente de seguridad

**GUÍA DE CIMENTACIONES EN OBRAS DE CARRETERA**
**Suelos**
**Resistencia unitaria por punta (largo plazo)**

$$q_p = (N_q \cdot \sigma'_v + N_c \cdot c) \cdot n$$

$$N_q = 1,5 \cdot \frac{1 + \text{sen}(\varphi)}{1 - \text{sen}(\varphi)} \cdot e^{\pi \cdot \text{tg}(\varphi)} \cdot f_D$$

$$N_c = \frac{N_q - 1}{\text{tg}(\varphi)}$$

$$f_D = 1 - D/3 > 2/3$$

$\varphi$  : ángulo de rozamiento interno del terreno

c : cohesión

$\sigma'_v$  : tensión vertical efectiva del terreno natural al nivel de punta

n : factor de corrección, 1 en caso de pilotes perforados o comprobación a corto plazo de pilotes hincados en suelo cohesivos, 2 en el resto de casos

**Resistencia unitaria por punta (corto plazo  $\varphi=0$ )**

$$q_p = (1,5 \cdot f_D \cdot \sigma'_v + 9 \cdot f_D \cdot c) \cdot n$$

$$f_D = 1 - D/3 > 2/3$$

$\varphi$  : ángulo de rozamiento interno del terreno

c : cohesión

$\sigma'_v$  : tensión vertical efectiva del terreno natural al nivel de punta

n : factor de corrección, 1 en caso de pilotes perforados o comprobación a corto plazo de pilotes hincados en suelo cohesivos, 2 en el resto de casos

**Resistencia unitaria por fuste**

$$\tau_f = (c + K_o \cdot \text{tg}(\delta) \cdot \sigma'_v) \cdot m \leq 90 \text{ kPa}$$

C : cohesión

$K_o$  : coeficiente de empuje al reposo

$\delta$  : Ángulo de fricción del contacto pilote-terreno

$K_o \cdot \text{tg}(\delta)$  puede suponerse 0,3 cuando no se disponga de información suficiente

Para comprobaciones a corto plazo en suelos arcillosos saturados:

## Desarrollo

$$\tau_f = \left( c_u \cdot \frac{100}{100 + c_u} \right) \cdot m \leq 70 \text{ kPa}$$

$c_u$ : resistencia al corte sin drenaje

m: factor de corrección para pilotes hincados, puede tomarse de la siguiente tabla

TIPO DE PILOTE	TIPO DE TERRENO	
	GRANULAR	COHESIVO
Pilotes de hormigón	1,3	0,9
Pilotes de acero	0,9	0,6
Pilotes de madera	1,4	1,0

Tabla 5: Coeficiente corrector por hinca

### Roca

#### Resistencia unitaria por punta

$$q_p = 2 \cdot d_f \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \sqrt{q_u} \leq 20 \text{ MPa}$$

$$d_f = 1 + 0,4 \cdot \frac{L_r}{D} \leq 2$$

$q_u$  : resistencia a compresión simple de la roca sana (MPa)

$L_r$  : profundidad de empotramiento

$\alpha_{1,2,3}$  : Parámetros adimensionales de la roca, definidos en la norma

GRUPO N.º	NOMBRE GENÉRICO	EJEMPLOS	$\alpha_1$
1	Rocas carbonatadas con estructura bien desarrollada	<ul style="list-style-type: none"> <li>Calizas, dolomías y mármoles puros</li> <li>Calcarenitas de baja porosidad</li> </ul>	1,0
2	Rocas ígneas y rocas metamórficas (*)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Granitos, cuarcitas</li> <li>Andesitas, riolitas</li> <li>Pizarras, esquistos y gneises (esquistosidad subhorizontal)</li> </ul>	0,8
3	Rocas sedimentarias (**) y algunas metamórficas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Calizas margosas, argilitas, limolitas, areniscas y conglomerados</li> <li>Pizarras y esquistos (esquistosidad verticalizada)</li> <li>Yesos</li> </ul>	0,6
4	Rocas poco soldadas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Areniscas, limolitas y conglomerados poco cementados</li> <li>Margas</li> </ul>	0,4

(\*) A excepción de las indicadas en los grupos 1 y 3.

(\*\*) A excepción de las indicadas en los grupos 1 y 4.

Tabla 6: Tipos de Rocas (Dirección General de Carreteras)

GRADO	DENOMINACIÓN	CRITERIO DE RECONOCIMIENTO
I	Roca sana o fresca	La roca no presenta signos visibles de meteorización, pueden existir ligeras pérdidas de color o pequeñas manchas de óxidos en los planos de discontinuidad.
II	Roca ligeramente meteorizada	La roca y los planos de discontinuidad presentan signos de decoloración. Toda la roca ha podido perder su color debido a la meteorización y superficialmente ser más débil que la roca sana.
III	Roca moderadamente meteorizada	Menos de la mitad del material está descompuesto a suelo. Aparece roca sana o ligeramente meteorizada de forma continua o en zonas aisladas.

Tabla 7: Grados de meteorización (Dirección General de Carreteras)

Grado de meteorización I (Roca sana o fresca):  $\alpha_2 = 1,0$

Grado de meteorización II (Roca ligeramente meteorizada):  $\alpha_2 = 0,7$

Grado de meteorización III (Roca moderadamente meteorizada):  $\alpha_2 = 0,5$

$$\alpha_3 = \min(\alpha_{3a}, \alpha_{3b}) \quad \alpha_{3a} = \sqrt{\frac{s}{1m}} \quad \alpha_{3b} = \sqrt{\frac{RQD(\%)}{100}}$$

#### Resistencia unitaria por fuste

$$\tau_f = 0,1 \cdot q_p \leq 2 \text{ MPa}$$

## RECOMENDACIONES PARA OBRAS MARÍTIMAS

### Suelo granular

#### Resistencia unitaria por punta

$$q_p = 3 \cdot \sigma'_v \cdot \frac{1 + \operatorname{sen}(\varphi)}{1 - \operatorname{sen}(\varphi)} \cdot e^{\pi \cdot \operatorname{tg}(\varphi)} \cdot f_D \leq 20 \text{ MPa}$$

$$f_D = 1 - \frac{D}{3} > 0,7$$

$\sigma'_v$  : tensión vertical efectiva del terreno natural al nivel de punta

$\varphi$  : ángulo de rozamiento interno del terreno

en caso de pilotes excavados el valor obtenido se multiplicará por 0,5

#### Resistencia unitaria por fuste

$$\tau_f = K \cdot \sigma'_v \cdot f \cdot \operatorname{tg}(\varphi) \leq 125 \text{ kPa (pilotes hincados) o } 70 \text{ kPa (pilotes excavados)}$$

K : 0,75 para pilotes hincados, 0,5 para pilotes perforados

$\sigma'_v$  : tensión vertical efectiva al nivel considerado

f : 0,9 para pilotes de acero, 1 en el resto de casos

$\varphi$  : ángulo de rozamiento interno del terreno

### Suelo cohesivo

#### Resistencia unitaria por punta a corto plazo

$$q_p = (9 - 3 \cdot D) \cdot c_u > 6 \cdot c_u$$

$c_u$  : la resistencia al corte sin drenaje del suelo cohesivo, teniendo en cuenta la presión de confinamiento al nivel de la punta

D: diámetro en metros

#### Resistencia unitaria por fuste a corto plazo

$$\tau_f = \frac{100 \cdot c_u}{100 + c_u}$$

$c_u$  y  $\tau_f$  en KPa

En pilotes con fuste de acero en suelos finos, el valor de  $\tau_f$  a corto plazo se afectará por un coeficiente reductor de 0,8



**Resistencia unitaria por punta a largo plazo**

$$q_p = (3 \cdot N_q \cdot \sigma'_v + 3 \cdot N_c \cdot c) \cdot f_D$$

$$N_q = 1,5 \cdot \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} \cdot e^{\pi \cdot \text{tg}(\varphi)}$$

$$N_c = \frac{N_q - 1}{\text{tg}(\varphi)}$$

$$f_D = 1 - \frac{D}{3} > 0,7$$

$\varphi$  : ángulo de rozamiento interno del terreno

c : cohesión

$\sigma'_v$  : tensión vertical efectiva del terreno natural al nivel de punta

En pilotes excavados se tomará la mitad del valor obtenido

**Resistencia unitaria por fuste a largo plazo**

$$\tau_f = K \cdot \sigma'_v \cdot f \cdot \text{tg}(\varphi) + c$$

K : 0,75 para pilotes hincados, 0,5 para pilotes perforados

$\sigma'_v$  : tensión vertical efectiva al nivel considerado

f : 0,9 para pilotes de acero, 1 en el resto de casos

$\varphi$  : ángulo de rozamiento interno del terreno

c: cohesión efectiva del terreno

## Desarrollo

**Roca****Resistencia unitaria por punta**

$$q_p = \frac{2}{3} \cdot 3 \cdot \sqrt{q_u} \cdot f_D \cdot f_A \cdot \left(1 + 0,4 \cdot \frac{L_R}{D}\right)$$

$q_u$  : resistencia a compresión simple de la roca sana (MPa)

$f_D$ : factor de reducción por diaclasamiento

$$f_D = \min \left\{ 2 \cdot \sqrt{\frac{S}{D}} ; 0,2 \cdot \sqrt{\frac{RQD(\%)}{D}} \right\}$$

$f_A$ : factor de reducción por grado de alteración de la roca, según tabla e indicaciones de la norma

$L_R$ : longitud de empotramiento (<2,5·D)

$S$ : espaciamiento entre litoclasas (>0,1 m)

$D$ : diámetro del pilote

Grado de meteorización (ver 2.2.9.7)	Factor $f_A$
I	I
II	0,7
III	0,5

Tabla 8: Factor de alteración (Puertos del Estado)

Grado	Denominación	Criterio de reconocimiento
I	Roca sana	La roca no presenta signos visibles de meteorización, pueden existir ligeras pérdidas de color o pequeñas manchas de óxidos en los planos de discontinuidad.
II	Roca ligeramente meteorizada	La roca y los planos de discontinuidad presentan signos de decoloración. Toda la roca ha podido perder su color original debido a la meteorización y superficialmente ser más débil que la roca sana.
III	Roca moderadamente meteorizada	Menos de la mitad del material está descompuesto a suelo. Aparece roca sana o ligeramente meteorizada de forma continua o en zonas aisladas.

Tabla 9: Grados de Meteorización (Puertos del Estado)

**Resistencia unitaria por fuste**

$$\tau_f = \frac{3}{10} \cdot \sqrt{q_u} \cdot f_D \cdot f_A < 2 \text{ MPa}$$

$q_u$  : resistencia a compresión simple de la roca sana (MPa)

$f_D$ : factor de reducción por diaclasamiento

$$f_D = \min \left\{ 2 \cdot \sqrt{\frac{S}{D}} ; 0,2 \cdot \sqrt{\frac{RQD(\%)}{D}} \right\}$$

$f_A$ : factor de reducción por grado de alteración de la roca, según tabla e indicaciones de la norma

## GUÍA DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA

### Suelos

#### Resistencia unitaria por fuste

$$R_{f,c,d}(z) = \frac{c'}{F_c} + \sigma'_v(z) \cdot K_o \cdot \frac{tg \delta}{F_\phi}$$

$C'$  : cohesión

$\sigma'_v$  : tensión vertical efectiva del terreno natural

$K_o$ : Coeficiente de empuje al reposo

$\delta$  : Ángulo de fricción del contacto pilote-terreno

TIPO DE APLICACIÓN	$F_c$	$F_\phi$
Estructuras de cimentación de nueva construcción	1,50	1,50
Recalce de estructuras de cimentación preexistentes	1,20	1,20

Tabla 10: Factores de seguridad micropilotes (Dirección General de Carreteras)

Suelos arcillosos saturados a corto plazo

$$R_{f,c,d} = \frac{s_u}{0,9 \cdot F_c}$$

$s_u$ : resistencia al corte sin drenaje

#### Resistencia unitaria por punta

No se recomienda su consideración en general

$$R_{p,d} \leq 0,15 \cdot R_{f,c,d}$$

### Roca

Las resistencias unitarias pueden extraerse de la siguiente tabla

TIPO DE ROCA	$f_{c,d}$ (MPa)	$q_{ps,d}$
Margas y margocalizas	0,15 - 0,40	$0,07 \cdot q_u$
Pizarras y otros esquistos	0,20 - 0,30	$0,07 \cdot q_u$
Areniscas	0,30 - 0,45	$0,07 \cdot q_u$
Calizas y dolomías	0,40 - 0,50	$0,10 \cdot q_u$
Granitos y basaltos	0,40 - 0,60	$0,10 \cdot q_u$

Tabla 11: Resistencias unitarias en rocas (Dirección General de Carreteras)

#### 4.2.4. Efecto grupo

Para la consideración de la carga de hundimiento del grupo de pilotes existen dos tipos distintos de procedimientos claramente diferenciados: el método del coeficiente de eficiencia, expuesto en el Código Técnico y el método de la cimentación equivalente, que se contempla en todas las guías.

##### **El método del coeficiente de eficiencia**

El efecto del grupo ha de comprobarse siempre que la separación entre ejes de pilotes sea inferior a 3 diámetros. En este caso se considera que la carga de hundimiento del grupo es igual a la carga de hundimiento del pilote individual multiplicada por un coeficiente de eficiencia que puede calcularse en función de la separación entre ejes.

$$R_{ckg} = \eta \cdot n \cdot R_{ck}$$

$$\eta = 0,7 + 0,3 \frac{K - 1}{2}$$

Siendo K la separación entre ejes, medida en diámetros

##### **El método de la cimentación equivalente**

Ha de comprobarse el efecto grupo considerando al conjunto de los pilotes unidos por un mismo encepado como un único pilote, tomando como área la que circunscriba al resto y aplicando a éste las fórmulas de resistencia de hundimiento.

Para la definición del pilote conjunto se va a suponer que es la mínima área circular o rectangular que circunscriba todos los pilotes. Esta suposición consigue buenas

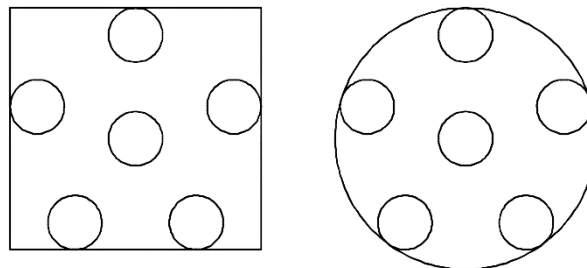
aproximaciones en disposiciones rectangulares o radiales, que son la mayoría de las empleadas habitualmente.

$$A_{\text{grupo}} = \text{mín} \left\{ \begin{array}{l} \left( \text{máx} \left\{ \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} \right\} \cdot 2 \cdot K \cdot D + D \right)^2 \cdot 0,25 \cdot \pi \\ \left( (\text{máx}(X_i) - \text{mín}(X_i)) \cdot K \cdot D + D \right) \cdot \left( (\text{máx}(Y_i) - \text{mín}(Y_i)) \cdot K \cdot D + D \right) \end{array} \right\}$$

El perímetro se definiría según el área que se emplee.

$$P_{\text{circular}} = \text{máx} \left\{ \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} \right\} \cdot 2 \cdot K \cdot D \cdot \pi$$

$$P_{\text{rectangular}} = (2 \cdot (\text{máx}(X_i) - \text{mín}(X_i)) \cdot K \cdot D + D) + 2 \cdot ((\text{máx}(Y_i) - \text{mín}(Y_i)) \cdot K \cdot D + D)$$



**Ilustración 3: Área de grupos de pilotes**

Se ha observado que asimilar el grupo de pilotes a un pilote equivalente puede ser enormemente restrictivo en los casos en que el pilote trabaja por punta, teniendo en cuenta las restricciones que se han comentado en el epígrafe 4.2.3, dado que al aumentar el diámetro las dimensiones de la zona de influencia se incrementan, y por tanto el empotramiento necesario en el estrato es mayor. Por esto dicho procedimiento no será adecuado para pilotes cuya punta se sitúe a profundidades cercanas a cambio de estratos. Sin embargo será válida para el resto de casos, y más adecuada para considerar el efecto del rozamiento negativo sobre el grupo que el método del coeficiente de eficiencia.

## Desarrollo

En vista de todas estas consideraciones se ha decidido permitir al usuario poder elegir que método emplear para considerar el efecto grupo<sup>3</sup>, si el del coeficiente de eficiencia o el de la cimentación equivalente, independientemente de la normativa escogida y, además, se ha incluido la opción de determinar la zona de influencia de la punta en función del diámetro de los pilotes que componen el grupo en lugar del diámetro del grupo en sí<sup>4</sup>.

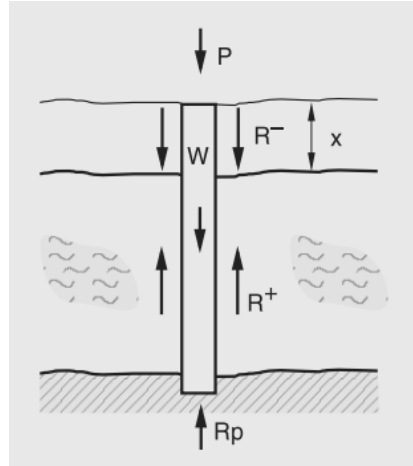
---

<sup>3</sup> Véase Manual de Usuario: Ajustes de cálculo

<sup>4</sup> Véase Anexo I: Apartado 3.13

### 4.2.5. Rozamiento negativo

El rozamiento negativo es un efecto parásito que se da cuando el terreno asienta más que el pilote, transmitiéndole parte de la carga a través del fuste.



**Ilustración 4: Fricción negativa (Dirección General de Carreteras)**

En el Código Técnico de la Edificación se propone una fórmula sencilla para su determinación:

$$F_{s,neg} = \sum \beta_i \cdot \sigma'_{vi}$$

Siendo B igual a 0,25 en arcillas y limos, 0,1 en arenas flojas y 0,8 en arenas densas.

La Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera propone utilizar la resistencia por fuste del terreno como rozamiento negativo.

$$Q_n = (c + K_o \cdot \text{tg}(\delta) \cdot \sigma'_v) * p * H$$

**Q<sub>n</sub>**: carga por rozamiento negativo

**C**: cohesión efectiva del relleno, algunos autores prefieren no considerarla

**K<sub>o</sub>**: coeficiente de empuje al reposo, puede tomarse como 1-sen(φ) en caso de que no exista sobreconsolidación

**δ**: ángulo de rozamiento pilote-terreno

**σ'<sub>v</sub>**: tensión efectiva a nivel medio de rellenos

**p**: perímetro del pilote

**H**: altura de los rellenos

La ROM 05 05, en contraste, no especifica ningún método de cálculo para este fenómeno.

## Desarrollo

Aunque la formulación difiere, todas las instrucciones coinciden en que es recomendable determinar la profundidad máxima hasta la que se debe calcular el rozamiento negativo, para evitar su sobrevaloración. Sin embargo, dado que esto requeriría un estudio geotécnico más detallado se ha optado por calcularlo para la profundidad total de los estratos de rellenos<sup>5</sup>. De la misma manera, en caso de que se prevea que vayan a producirse asientos en estratos que no sean rellenos habrá que caracterizar estos como tales al introducir los datos.

El programa empleará la siguiente fórmula para calcular el rozamiento negativo para todos los casos.

$$Q_n = K_o \cdot \text{tg}(\delta) \cdot \sigma'_v \cdot p \cdot H$$

Esta es una variación de la fórmula que plantea la Dirección General de Carreteras, pero es la sugerida en algunos de los manuales en que se han basado todas las instrucciones de cimentaciones actuales, y se ha empleado con validez desde hace décadas (Jiménez Salas, Cañizo, Escario, Molina, & Otros, 1976).

Para la consideración de posibles soluciones a este problema, como el empleo de pinturas bituminosas sobre el fuste, se deberán modificar los valores del ángulo de rozamiento entre el pilote y el terreno para adaptarse a la situación real.

### 4.2.6. Resistencia al arranque

La comprobación de arranque debe realizarse cuando un pilote se encuentra sometido a esfuerzos de tracción<sup>6</sup>. Esta situación es muy inusual, dado que los pilotes son una tipología especialmente pensada para soportar compresión, pero puede darse en algunas ocasiones específicas.

En estos casos el Código Técnico de Edificación y la Guía de Cimentaciones en obras de carretera establecen que la resistencia al arranque sea igual al 70% de la resistencia por fuste considerada a compresión, mientras que la ROM estipula que el axil de tracción no puede superar el 50% de la resistencia por fuste a compresión más el peso propio del pilote.

---

<sup>5</sup> Véase Anexo I: Apartado 3.10

<sup>6</sup> Véase Anexo I: Apartado 3.14



La guía de micropilotes especifica que la resistencia a tracción oscile entre el 60% y el 75% de la resistencia por fuste a compresión, dependiendo de si hay alternancia entre esfuerzos de tracción y compresión o si exclusivamente se dan esfuerzos de tracción, respectivamente.

### 4.2.7. *Coefficientes de seguridad*

Los coeficientes de seguridad se dividen en dos clases: aquellos que multiplican a las acciones, aumentando o disminuyendo su valor según la situación y la naturaleza de la carga, y aquellos que dividen la resistencia de los materiales.

En el caso de los pilotes, se emplean acciones sin mayorar, exceptuando el caso de los micropilotes. Así mismo, la resistencia del terreno ha de dividirse por un valor no inferior a los incluidos en la siguiente tabla.

	Situación Persistente	Situación transitoria	Situación accidental
Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera	3	2,6	2,2
Código Técnico de la Edificación	3	3	2
Recomendaciones para Obras Marítimas	2,5	2,2	2

**Tabla 12: Coeficientes de seguridad frente a hundimiento**

Se ha introducido la opción de seleccionar la situación de proyecto, y de esta forma obtener el coeficiente de seguridad mínimo relativo a materiales que exige cada norma, pero dejando al usuario la opción de definir el mismo el coeficiente que considere oportuno, y así poder adaptarse a situaciones más restrictivas en la que las guías especifiquen una mayor restricción. Para el caso de micropilotes, los coeficientes ya se encuentran considerados en la fórmula de resistencia del terreno, como puede observarse en el epígrafe 4.2.3.

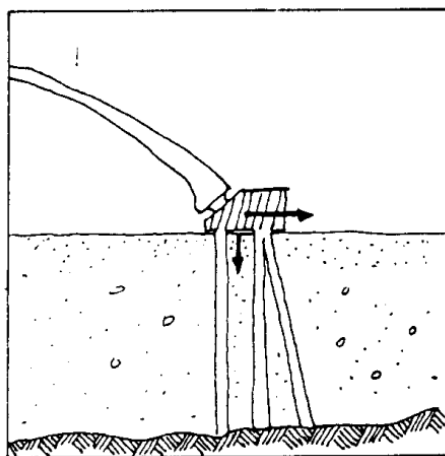
Existe también la singularidad de la consideración de la resistencia de macizos rocosos en el Código Técnico, con cuyas fórmulas se considera que se obtiene los valores de cálculo. En tal caso, para que el programa trabaje homogéneamente, en este caso se tomará como resistencia la obtenida mediante la fórmula y se multiplicará por el coeficiente especificado, para que así, al dividirla de nuevo posteriormente como al resto de estratos, el valor de cálculo sea el mismo.

## Desarrollo

Los coeficientes de seguridad frente a la situación arranque son siempre iguales o superiores a los de hundimiento, lo que ha de considerarse al realizar dicha comprobación según lo especificado en el epígrafe 4.2.6.

### 4.2.8. *Solicitaciones horizontales*

Para la consideración de las acciones horizontales sobre cabeza de pilote se va a tener en cuenta el siguiente criterio, en función de la proporción entre las cargas horizontales y verticales (Rodríguez Ortiz, Serra Gesta, & Oteo Mazo, 1989):



**Ilustración 5: Cargas Horizontales (Rodríguez Ortiz et al., 1989)**

- Si  $H < 0,05V$  No es necesario considerarlas
- Si  $0,05V < H < 0,1V$  las absorben los pilotes a flexión
- Si  $0,1V < H$  será necesario disponer pilotes inclinados o anclajes

Por lo tanto, se tendrán en cuenta cuando sean menores al 10% de las verticales, para la determinación del cortante máximo en cabeza de pilotes.

Se ha decidido no considerar en general los efectos de acciones importantes significativas porque, siendo los pilotes una tipología ideada para trabajar exclusivamente a compresión, con la salvedad de los micropilotes, y que existen soluciones alternativas a los pilotes verticales para contrarrestar dichas acciones, se supone que en la mayoría de los casos el proyectista no tendría necesidad de realizar los cálculos relativos a este tipo de solicitaciones, como por ejemplo la rotura por cortante, los movimientos horizontales, que a su vez se verían limitados por los elementos superficiales

de cimentación, como las vigas de atado o las losas, y la rotura horizontal del terreno provocada por cargas en cabeza de pilote.

### 4.2.9. Asientos

Para el cálculo del asiento del pilote individual todas las instrucciones establecen la misma fórmula, con variaciones mínimas entre ellas, que puede emplearse siempre que la carga de servicio esté suficientemente lejos de la de hundimiento, lo que se consigue respetando los coeficientes de seguridad mínimos comentados en el epígrafe 4.2.7.

$$s_i = \left( \frac{D}{40 R_{ck}} + \frac{(0,5 \cdot R_{fk} + R_{pk}) \cdot L}{R_{ck} \cdot A \cdot E} \right) \cdot N$$

**R<sub>ck</sub>**: carga de hundimiento

**R<sub>fk</sub>**: resistencia por fuste

**R<sub>pk</sub>**: resistencia por punta

**A**: área neta de la sección transversal del pilote

**E**: módulo elástico de la sección transversal del pilote

**L**: longitud del pilote (se supone toda ella enterrada)

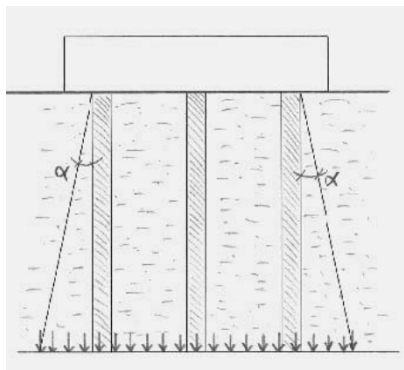
**N**: axil sobre el pilote

Para el caso de pilotes mixtos:

$$E \cdot A = \sum E_i \cdot A_i$$

El asiento de los grupos de pilotes es similar al de las cimentaciones superficiales equivalentes cuyo plano de apoyo estuviese ubicado prácticamente en a la zona de las puntas, con dimensiones en planta algo mayores que las del grupo, para tener en cuenta el reparto lateral de compresiones transmitidas por el fuste.

## Desarrollo



**Ilustración 6: Asientos de grupo (Jiménez Salas et al., 1976)**

$$s_g = s_i + 0,8 \frac{N_g(1 - \nu^2)}{E[(B_g + H_1) + (L_g + H_1)]^{\frac{1}{2}}}$$

$$H = \left( 1 - \frac{(0,5 \cdot R_{fk} + R_{pk})}{R_{ck}} \right) \cdot l$$

B,L: dimensiones del grupo de pilotes

E: módulo elástico al nivel de la punta

V: coeficiente de poisson al nivel de la punta

Aunque la fórmula especifique que se emplee el área del grupo suponiendo que es rectangular, se puede aplicar igualmente a áreas radiales, aumentando en un valor H el diámetro del grupo de pilotes<sup>7</sup>. De esta manera se conseguiría una mayor precisión en la consideración de los asientos para este tipo de disposiciones.

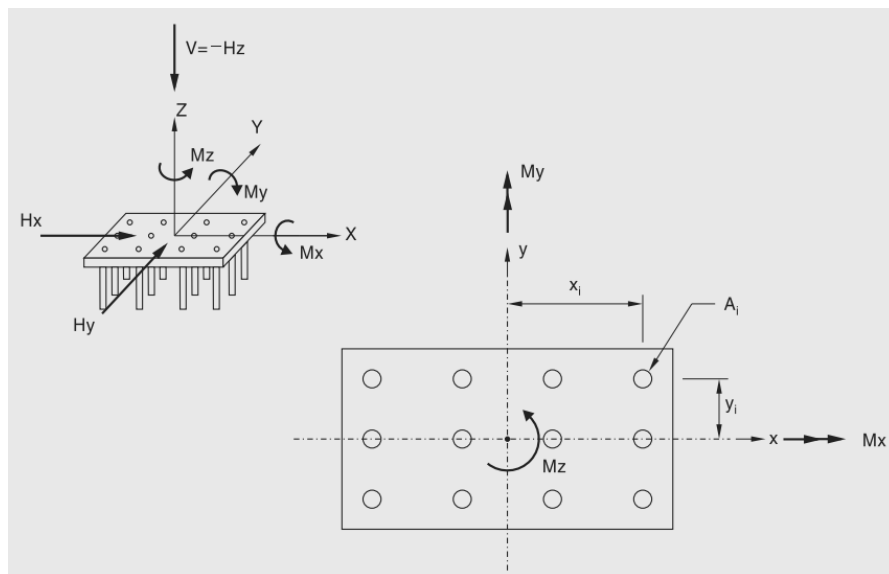
Aunque el hecho de que una estructura cimentada mediante pilotes tenga grandes asientos es inusual, salvo en algunos casos en los que se sitúen en suelos arcillosos, conviene su consideración para evitar posibles distorsiones angulares, cuyos límites pueden llegar a ser enormemente restrictivos en algunos casos.

---

<sup>7</sup> Véase Anexo I: Apartado 3.16

### 4.2.10. Cargas máxima y mínima sobre un pilote dentro de un grupo

Para calcular las solicitaciones máxima y mínima sobre las cabezas de los pilotes dentro de un grupo, se considera el modelo simplificado propuesto en todos los documentos de referencia, que asimila al encepado a un elemento rígido y que considera pilotes con cabeza articulada. Esta es una simplificación que da resultados válidos para la gran mayoría de los casos.



**Ilustración 7: Cargas sobre Encepados (Dirección General de Carreteras)**

$$N_o = \frac{A_i}{\sum A_i} \cdot V - \frac{A_i \cdot y_i}{\sum A_i \cdot y_i^2} \cdot M_x + \frac{A_i \cdot x_i}{\sum A_i \cdot x_i^2} \cdot M_y$$

$$H_{x_i} = \frac{A_i}{\sum A_i} \cdot H_x - \frac{A_i^2 \cdot y_i}{\sum A_i^2 \cdot (x_i^2 + y_i^2)} \cdot M_z$$

$$H_{y_i} = \frac{A_i}{\sum A_i} \cdot H_y - \frac{A_i^2 \cdot x_i}{\sum A_i^2 \cdot (x_i^2 + y_i^2)} \cdot M_z$$

Considerando que dentro de un mismo grupo se empleará un único tipo de pilote, opción muy extendida dado que de lo contrario podrían crearse problemas de interpretación en obra, las fórmulas se simplifican incluso más:

## Desarrollo

$$N_o = \frac{V}{n} - \frac{y_i}{\sum y_i^2} \cdot Mx + \frac{x_i}{\sum x_i^2} \cdot My$$

$$Hx_i = \frac{Hx}{n} - \frac{y_i}{\sum(x_i^2 + y_i^2)} \cdot Mz$$

$$Hy_i = \frac{Hy}{n} - \frac{x_i}{\sum(x_i^2 + y_i^2)} \cdot Mz$$

Para hallar las cargas máxima y mínima han de comprobarse uno a uno todos los pilotes. Dichas cargas determinarán la longitud de los pilotes del grupo, mediante el dimensionamiento para resistir el hundimiento y, en su caso, el arranque<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> Véase Anexo I: Apartados 3.5-3.7

## 4.3. PARAMETRIZACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para poder afrontar el problema los datos deben transformarse en una serie de variables simples que permitan definir todas las situaciones posibles que puedan darse.

Para poder afrontar el problema los datos deben transformarse en una serie de variables simples que permitan definir todas las situaciones posibles que puedan darse.

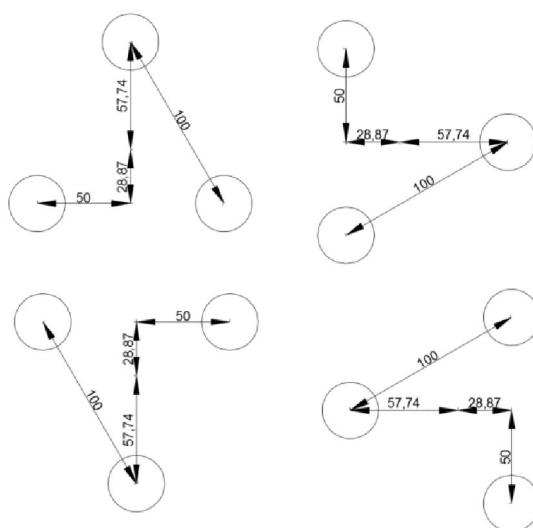
Habiéndose revisado la normativa y los cálculos planteados en los apartados anteriores se ha concluido que un grupo de pilotes queda totalmente definido si se conocen los siguientes datos del mismo:

- Tipo de pilote, que queda definido por:
  - Material: afecta al cálculo de la resistencia por fuste y a la consideración del peso propio del mismo.
  - Ejecución: afecta a los cálculos de resistencia del terreno
  - Tope estructural: determina la carga máxima que el pilote podrá soportar.
  - Geometría: las características geométricas del pilote afectarán tanto a las dimensiones del encepado como a los cálculos de resistencia del terreno, así como a la carga que puede soportar.
- Separación entre ejes: afectará a las dimensiones del encepado, y por tanto, al reparto de cargas, además de al peso propio del mismo.
- Tipo de encepado: Este es el factor más importante, do que determinará el reparto de cargas. Determinará además el peso del mismo y las dimensiones del grupo.
  - Número de pilotes
  - Coordenadas de los pilotes respecto al arranque
- Longitud de pilotes del encepado

### 4.3.1. Disposiciones de pilotes en encepados

Se han planteado las disposiciones de pilotes más empleadas comercialmente, definiendo para cada una de ellas las coordenadas X e Y desde el arranque en función de la separación de los diámetros. Para no plantear más cálculos de los necesarios se han planteado las posibles variantes de cada una teniendo en cuenta giros de 90°, 180° y 270° en las que correspondiese.

A continuación se resumen las características geométricas de cada una, ilustrándolas con un esquema.

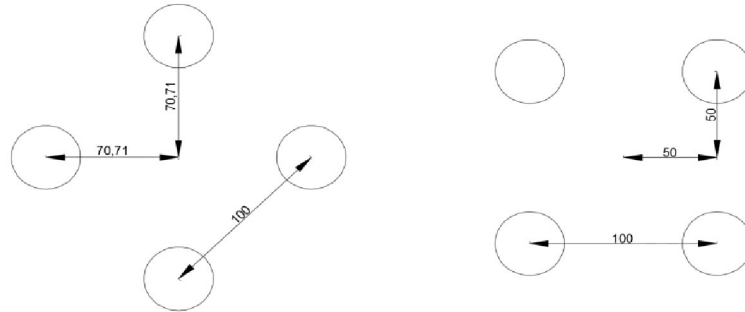


**Ilustración 8: Disposiciones de 3 pilotes**

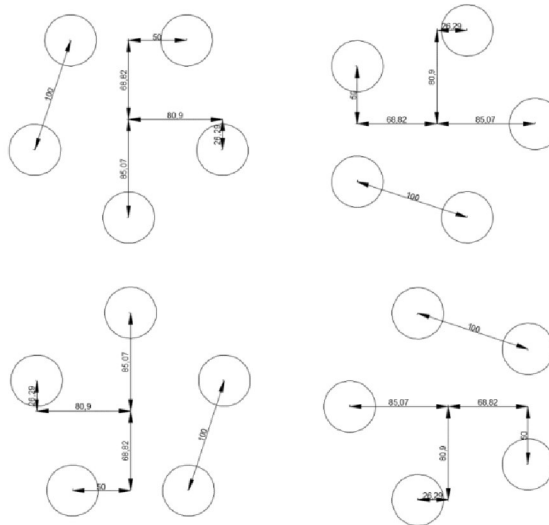
$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$	$X_3$	$Y_3$
0,0000	0,5774	0,5000	-0,2887	-0,5000	-0,2887
-0,2887	0,5000	-0,2887	-0,5000	0,5774	0,0000
0,0000	-0,5774	0,5000	0,2887	-0,5000	0,2887
0,2887	0,5000	0,2887	-0,5000	-0,5774	0,0000

**Tabla 13: Coordenadas en disposiciones de 3 pilotes**




**Ilustración 9: Disposiciones de 4 pilotes**

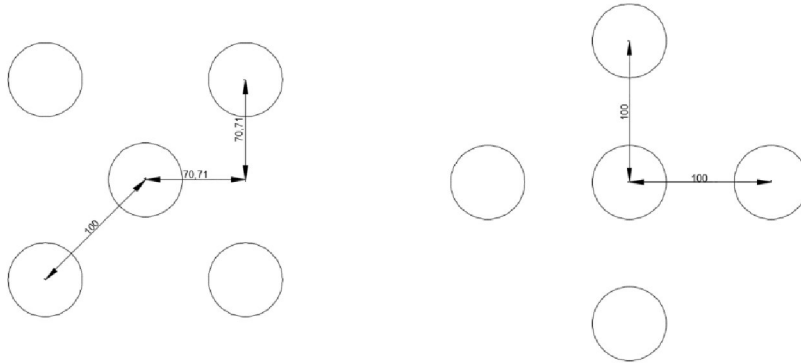
$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$	$X_3$	$Y_3$	$X_4$	$Y_4$
-0,7071	0,0000	0,7071	0,0000	0,0000	0,7071	0,0000	-0,7071
-0,5000	-0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	-0,5000	-0,5000	0,5000

**Tabla 14: Coordenadas en disposiciones de 4 pilotes**

**Ilustración 10: Disposiciones de 5 pilotes (pentagonales)**

$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$	$X_3$	$Y_3$	$X_4$	$Y_4$	$X_5$	$Y_5$
-0,5000	0,6882	0,5000	0,6882	-0,8090	-0,2629	0,8090	-0,2629	0,0000	-0,8507
-0,6882	0,5000	-0,6882	-0,5000	0,2629	0,8090	0,2629	-0,8090	0,8507	0,0000
-0,8090	0,2629	0,8090	0,2629	-0,5000	-0,6882	0,5000	-0,6882	0,0000	0,8507
-0,8507	0,0000	-0,2629	-0,8090	-0,2629	0,8090	0,6882	0,5000	0,6882	-0,5000

**Tabla 15 : Coordenadas en disposiciones de 5 pilotes (pentagonales)**

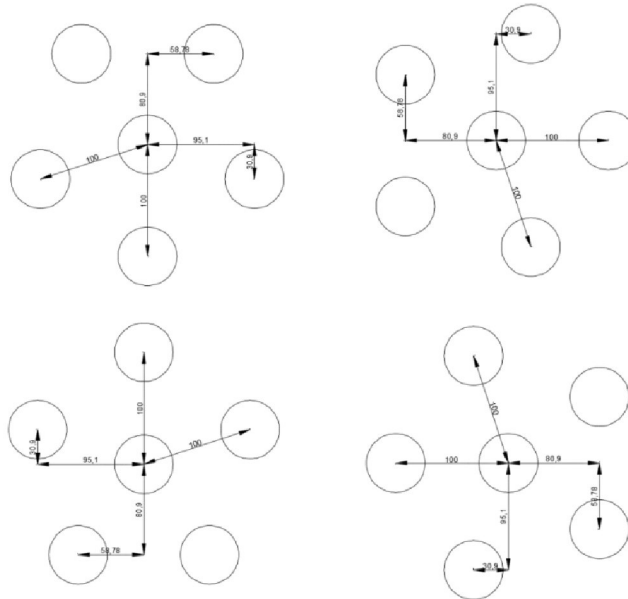
Desarrollo



**Tabla 16: Disposiciones de 5 pilotes (cuadradas)**

$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$	$X_3$	$Y_3$	$X_4$	$Y_4$	$X_5$	$Y_5$
0,0000	0,0000	-0,7071	0,7071	-0,7071	-0,7071	0,7071	-0,7071	0,7071	-0,7071
0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000	-1,0000	0,0000	0,0000	-1,0000

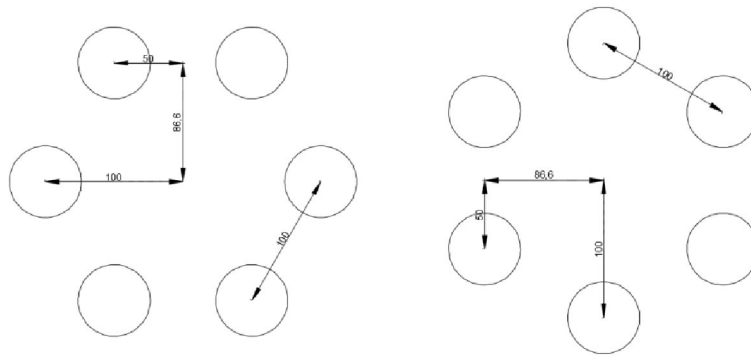
**Tabla 17: Coordenadas en disposiciones de 5 pilotes (cuadradas)**



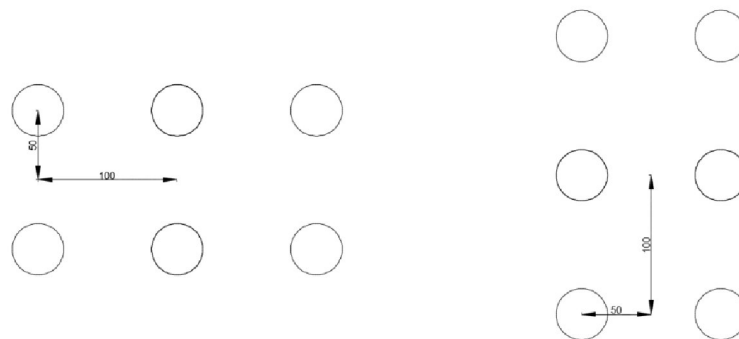
**Ilustración 11: Disposiciones de 6 pilotes (pentagonales)**

$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$	$X_3$	$Y_3$	$X_4$	$Y_4$	$X_5$	$Y_5$	$X_6$	$Y_6$
-0,9510	-0,3090	0,9510	-0,3090	0,0000	-1,0000	-0,5878	0,8090	0,5878	0,8090	0,0000	0,0000
-0,8090	0,5878	-0,8090	-0,5878	0,3090	0,9510	0,3090	-0,9510	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
-0,9510	0,3090	0,9510	0,3090	0,0000	1,0000	-0,5878	-0,8090	0,5878	-0,8090	0,0000	0,0000
0,8090	0,5878	0,8090	-0,5878	-0,3090	0,9510	-0,3090	-0,9510	-1,0000	0,0000	0,0000	0,0000

**Tabla 18:Coordenadas en disposiciones de 6 pilotes (pentagonales)**


**Ilustración 12: Disposiciones de 6 pilotes (hexagonales)**

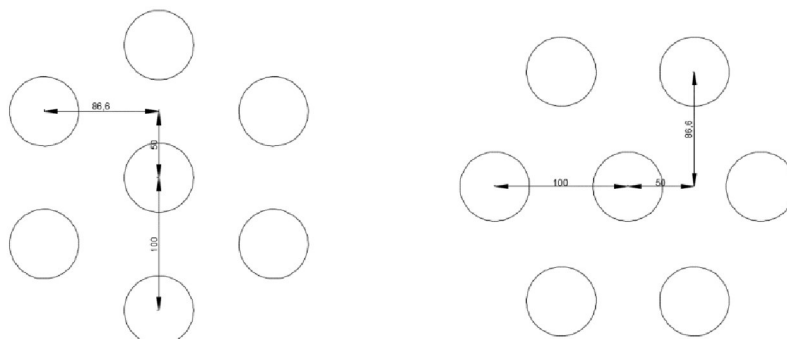
$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$	$X_3$	$Y_3$	$X_4$	$Y_4$	$X_5$	$Y_5$	$X_6$	$Y_6$
-1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	-0,5000	0,8660	-0,5000	-0,8660	0,5000	0,8660	0,5000	-0,8660
-0,8660	0,5000	-0,8660	-0,5000	0,8660	0,5000	0,8660	-0,5000	0,0000	1,0000	0,0000	-1,0000

**Tabla 19: Coordenadas en disposiciones de 6 pilotes (hexagonales)**

**Ilustración 13: Disposiciones de 6 pilotes (rectangulares)**

$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$	$X_3$	$Y_3$	$X_4$	$Y_4$	$X_5$	$Y_5$	$X_6$	$Y_6$
-1,0000	0,5000	-1,0000	-0,5000	0,0000	0,5000	0,0000	-0,5000	1,0000	0,5000	1,0000	-0,5000
-0,5000	1,0000	-0,5000	0,0000	-0,5000	-1,0000	0,5000	1,0000	0,5000	0,0000	0,5000	-1,0000

**Tabla 20: Coordenadas en disposiciones de 6 pilotes (rectangulares)**

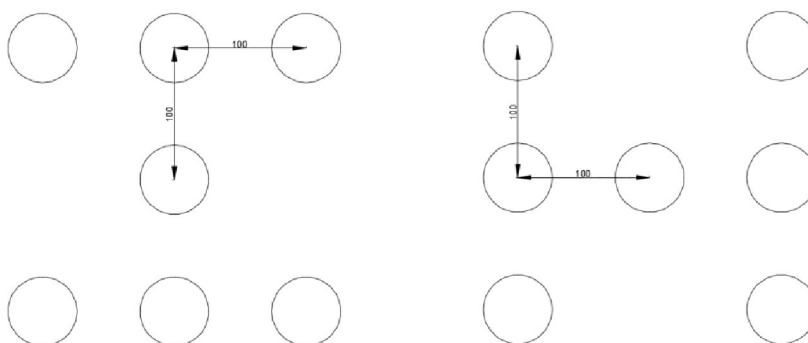
Desarrollo



**Ilustración 14: Disposiciones de 7 pilotes (hexagonales)**

$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$	$X_3$	$Y_3$	$X_4$	$Y_4$	$X_5$	$Y_5$	$X_6$	$Y_6$	$X_7$	$Y_7$
-1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	-0,5000	0,8660	-0,5000	-0,8660	0,5000	0,8660	0,5000	-0,8660	0,0000	0,0000
-0,8660	0,5000	-0,8660	-0,5000	0,8660	0,5000	0,8660	-0,5000	0,0000	1,0000	0,0000	-1,0000	0,0000	0,0000

**Tabla 21: Coordenadas en disposiciones de 7 pilotes (hexagonales)**



**Ilustración 15: Disposiciones de 7 pilotes (doble T)**

$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$	$X_3$	$Y_3$	$X_4$	$Y_4$	$X_5$	$Y_5$	$X_6$	$Y_6$	$X_7$	$Y_7$
-1,0000	1,0000	-1,0000	-1,0000	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000	1,0000	-1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	-1,0000
-1,0000	1,0000	-1,0000	-1,0000	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000	1,0000	-1,0000	-1,0000	0,0000	1,0000	0,0000

**Tabla 22: Coordenadas en disposiciones de 7 pilotes (doble T)**

N	X1	Y1	X2	Y2	X3	Y3	X4	Y4	X5	Y5	X6	Y6	X7	Y7
3	0,0000	0,5774	0,5000	-0,2887	-0,5000	-0,2887								
3	-0,2887	0,5000	-0,2887	-0,5000	0,5774	0,0000								
3	0,0000	-0,5774	0,5000	0,2887	-0,5000	0,2887								
3	0,2887	0,5000	0,2887	-0,5000	-0,5774	0,0000								
4	-0,7071	0,0000	0,7071	0,0000	0,0000	0,7071	0,0000	-0,7071						
4	-0,5000	-0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	-0,5000	-0,5000	0,5000						
5	-0,5000	0,6882	0,5000	0,6882	-0,8090	-0,2629	0,8090	-0,2629	0,0000	-0,8507				
5	-0,6882	0,5000	-0,6882	-0,5000	0,2629	0,8090	0,2629	-0,8090	0,8507	0,0000				
5	-0,8090	0,2629	0,8090	0,2629	-0,5000	-0,6882	0,5000	-0,6882	0,0000	0,8507				
5	-0,8507	0,0000	-0,2629	-0,8090	-0,2629	0,8090	0,6882	0,5000	0,6882	-0,5000				
5	0,0000	0,0000	-0,7071	0,7071	-0,7071	-0,7071	0,7071	-0,7071	0,7071	-0,7071				
5	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000	-1,0000	0,0000	0,0000	-1,0000				
6	-0,9510	-0,3090	0,9510	-0,3090	0,0000	-1,0000	-0,5878	0,8090	0,5878	0,8090	0,0000	0,0000		
6	-0,8090	0,5878	-0,8090	0,5878	0,3090	0,9510	0,3090	0,9510	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
6	-0,9510	0,3090	0,9510	0,3090	0,0000	1,0000	-0,5878	-0,8090	0,5878	-0,8090	0,0000	0,0000		
6	0,8090	0,5878	0,8090	0,5878	-0,3090	0,9510	-0,3090	0,9510	-1,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
6	-1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	-0,5000	0,8660	-0,5000	-0,8660	0,5000	0,8660	0,5000	-0,8660		
6	-0,8660	0,5000	-0,8660	-0,5000	0,8660	0,5000	0,8660	-0,5000	0,0000	1,0000	0,0000	-1,0000		
6	-1,0000	0,5000	-1,0000	-0,5000	0,0000	0,5000	0,0000	-0,5000	1,0000	0,5000	1,0000	-0,5000		
6	-0,5000	1,0000	-0,5000	0,0000	-0,5000	-1,0000	0,5000	1,0000	0,5000	0,0000	0,5000	-1,0000		
7	-1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	-0,5000	0,8660	-0,5000	-0,8660	0,5000	0,8660	0,5000	-0,8660	0,0000	0,0000
7	-0,8660	0,5000	-0,8660	-0,5000	0,8660	0,5000	0,8660	-0,5000	0,0000	1,0000	0,0000	-1,0000	0,0000	0,0000
7	-1,0000	1,0000	-1,0000	-1,0000	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000	1,0000	-1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	-1,0000
7	-1,0000	1,0000	-1,0000	-1,0000	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000	1,0000	-1,0000	-1,0000	0,0000	1,0000	0,0000

**Tabla 23: Matriz resumen de disposiciones**

Esta matriz es la que lleva incorporada el programa, y podrá ser complementada con las disposiciones que defina el usuario. De ella se extraerán los siguientes datos:

- **Coordenadas X máxima y mínima:** sirven para determinar las dimensiones del grupo de pilotes.
- **Coordenadas Y máxima y mínima:** sirven para determinar las dimensiones del grupo de pilotes.
- **Distancia entre el eje del pilote más alejado y el arranque:** sirve tanto para determinar el área como para determinar el canto.
- **Inercia en x (suma de cuadrados):** sirve para la determinación de la carga máxima
- **Inercia en y (suma de cuadrados):** sirve para la determinación de la carga máxima

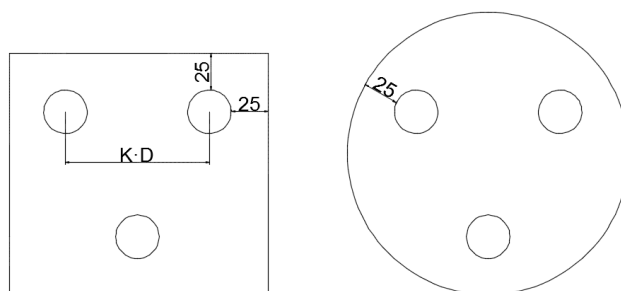
Dado que el programa se ha planteado de manera que los pilotes no soporten momentos en cabeza en ningún momento y, observando que, en caso de que alguna de las inercias o sumas de cuadrados fuese cero, se daría dicha situación, se consideran inadmisibles las disposiciones de pilotes lineales.

### 4.3.2. Determinación del volumen de encepado

Para el dimensionamiento de los pilotes es necesario incluir también el peso del encepado que corresponde a cada uno, por lo que se debe calcular previamente el volumen del mismo. Dado que existe la posibilidad de que el usuario defina sus propias disposiciones, se ha optado por crear un procedimiento que permita aproximar el área del mismo en función del diámetro  $D$ , el factor de separación  $K=L/D$ , donde  $L$  es la separación mínima entre ejes, y las coordenadas de cada pilote.

El procedimiento consiste en calcular el área de un círculo que circunscriba todos los pilotes y la de un rectángulo que comprenda también todos los pilotes, habiendo siempre una distancia mínima de 25 cm entre el borde de los pilotes y el borde exterior del encepado, de acuerdo con las especificaciones de la EHE-08. Dado que ambas darán una sobrevaloración, se escogerá la menor de las dos, que será la que más se ajuste a la realidad. Este es un procedimiento sencillo y que siempre dará resultados que queden del lado de la seguridad, y puede resumirse en la siguiente fórmula<sup>9</sup>.

$$A_{\text{encepado}} = \min \left\{ \begin{array}{l} \left( \max \left\{ \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} \right\} \cdot 2 \cdot K \cdot D + D + 0,5 \right)^2 \cdot 0,25 \cdot \pi \\ \left( (\max(X_i) - \min(X_i)) \cdot K \cdot D + D + 0,5 \right) \cdot \left( (\max(Y_i) - \min(Y_i)) \cdot K \cdot D + D + 0,5 \right) \end{array} \right\}$$



**Ilustración 16: Área de los encepados**

Para hallar el volumen además del área es necesario conocer el canto del encepado. Dado que el dimensionamiento de encepados y demás elementos superficiales

<sup>9</sup> Véase Anexo I: Apartado 3.8

de cimentación no está contemplado en el alcance de este Trabajo, se van a plantear dos opciones para determinar este valor.

- Encepado rígido: el canto es la mitad del mayor vuelo, es decir de la distancia mayor entre el eje de un pilote y el del arranque. Aunque normalmente la distancia se toma en una dirección principal, se toma esta consideración porque será siempre más restrictiva
- Encepado de canto mínimo: el canto será el valor máximo de los siguientes, según la instrucción EHE-08:
  - 40 cm
  - Diámetro de los pilotes

### 4.3.3. Tipos de pilotes considerados

Se han planteado una serie de geometrías básicas para los pilotes, en función del material y el procedimiento de ejecución, para que puedan adaptarse a la mayoría de las situaciones posibles.

Los pilotes perforados tienen geometría circular maciza, mientras que los hincados variarán en función del material. Aquellos de hormigón o de madera tendrán geometría cuadrada o circular maciza, y para los metálicos se han empleado tablas de perfiles comerciales obtenidas de los catálogos de los fabricantes.

	H(mm)	B(mm)	Areal(cm <sup>2</sup> )	Aencerrada(cm <sup>2</sup> )	Perímetro(mm)
HP 200 x 43	200	205	54,1	410	810
HP 200 x 53	204	207	68,4	422,28	822
HP 220 x 57	210	224,5	72,9	471,45	869
HP 260 x 75	249	265	95,5	659,85	1028
HP 260 x 87	253	267	111	675,51	1040
HP 305 x 79	299,3	306,4	101	917,0552	1211,4
HP 305 x 88	301,7	307,8	112	928,6326	1219
HP 305 x 95	303,7	308,7	121	937,5219	1224,8
HP 305 x 110	307,9	310,7	140	956,6453	1237,2
HP 305 x 126	312,3	312,9	161	977,1867	1250,4
HP 305 x 149	318,5	316	190	1006,46	1269
HP 305 x 180	326,7	319,7	229	1044,4599	1292,8
HP 305 x 186	328,3	320,9	237	1053,5147	1298,4
HP 305 x 223	337,9	325,7	284	1100,5403	1327,2
HP 320 x 88	303	304	113	921,12	1214
HP 320 x 103	307	306	131	939,42	1226
HP 320 x 117	311	308	150	957,88	1238
HP 320 x 147	319	312	187	995,28	1262
HP 320 x 184	329	317	235	1042,93	1292
HP 360 x 109	346,4	371	139	1285,144	1434,8
HP 360 x 133	352	373,8	169	1315,776	1451,6
HP 360 x 152	356,4	376	194	1340,064	1464,8
HP 360 x 174	361,4	378,5	222	1367,899	1479,8
HP 360 x 180	362,9	378,8	230	1374,6652	1483,4
HP 400 x 122	348	390	156	1357,2	1476
HP 400 x 140	352	392	179	1379,84	1488
HP 400 x 158	356	394	201	1402,64	1500
HP 400 x 176	360	396	224	1425,6	1512
HP 400 x 194	364	398	248	1448,72	1524
HP 400 x 213	368	400	271	1472	1536
HP 400 x 231	372	402	294	1495,44	1548

**Tabla 24: Perfiles metálicos comerciales HP (Arcelormittal)**



El usuario puede generar los pilotes que considere, en base al área encerrada por el contorno del pilote, al área neta de la sección, es decir, la ocupada realmente por el material del pilote y al perímetro mínimo que circunscribe la sección, que en el caso de perfiles metálicos será igual al rectángulo de área mínima que lo circunscribe.

Los parámetros geométricos relativos a un pilote necesarios para los cálculos, son los siguientes:

- **Área neta:** área real de la sección del pilote, es decir, aquella realmente ocupada por el material del mismo.
- **Área encerrada:** área mínima que circunscribe la sección del pilote. En caso de perfiles macizos coincidirá con la real, pero si se trata de pilotes huecos de estilo tubular o perfiles metálicos ambas diferirán enormemente.
- **Perímetro:** perímetro mínimo que circunscribe al pilote.
- **Diámetro equivalente de área:** diámetro que tendría el pilote en relación a su área encerrada, suponiendo que tuviese forma circular.
- **Diámetro equivalente de perímetro:** diámetro que tendría el pilote en relación a su perímetro, suponiendo que tuviese forma circular.

Estos parámetros se almacenarán en una tabla, con el añadido del identificador, es decir, un nombre que permita identificar el pilote sin necesidad de analizar el resto de parámetros.

Para el caso de micropilotes cada tipo corresponderá a una combinación diferente de los parámetros diámetro, resistencia de la lechada, armadura tubular, acero de armadura tubular, número de barras de refuerzo y acero de dichas barras.

En este caso se ha optado por almacenar esta información dentro del identificador, de manera que pueda extraerse cuando sea necesario<sup>10</sup>. De esta manera se evita el añadir parámetros a la tabla que solo serían de aplicación para este caso específico.

---

<sup>10</sup> Véase Anexo I: Apartados 3.11.1 y 4

## Desarrollo

La designación que se ha creado para los micropilotes es la siguiente:

$$\mathbf{MP\ D - f_{ck} - D_{ext}/esp/f_{yk} - n/d/f_{sk}}$$

**MP**-Abreviatura de micropilote

**D**-Diámetro exterior en mm

**F<sub>ck</sub>**-resistencia característica de la lechada o el mortero

**D<sub>ext</sub>**- diámetro exterior de la armadura tubular

**Esp**-espesor de la armadura tubular

**F<sub>yk</sub>**-límite elástico de la armadura tubular

**n**-número de refuerzos

**d**-diámetro de los refuerzos

**f<sub>sk</sub>**-límite elástico de los refuerzos

#### 4.3.4. Terreno

Para poder realizar los cálculos de resistencia al hundimiento del terreno de cimentación deben conocerse los siguientes datos de todos los estratos que lo conforman:

- Datos geométricos
  - Profundidad inicial
  - Profundidad final
- Datos geotécnicos
  - Tipo de terreno
  - Densidad seca
  - Densidad saturada
  - Ángulo de rozamiento interno
  - Cohesión efectiva
  - Resistencia a corte sin drenaje
  - Coeficiente de empuje al reposo
  - Ángulo de rozamiento pilote- terreno
  - Módulo elástico
  - Coeficiente de poisson
  - Resistencia a compresión simple(rocas)
  - Características de meteorización(rocas)

Además deberá conocerse la profundidad del nivel freático, que a efectos de este Trabajo solamente se tendrá en consideración respecto a su afección a la tensión efectiva, tal y como se especifica en el epígrafe 4.3.6.

### 4.3.5. Tensión efectiva del terreno

La tensión efectiva del terreno se emplea en la mayoría de las fórmulas de resistencia del terreno, por lo que es necesario poder definir su valor a cualquier profundidad. Depende de los espesores y densidades de los diferentes estratos, así como de la posición del nivel freático<sup>11</sup>.

$$\sigma'_z = \sum \gamma \cdot \Delta z + \sum \gamma_{\text{sat}} \cdot \Delta z' - \gamma_w \sum \Delta z'$$

Donde

$\sigma'_z$ : tensión efectiva a una profundidad  $z$

$\gamma$ : peso específico del terreno seco

$\gamma_{\text{sat}}$ : peso específico del terreno saturado

$\gamma_w$ : peso específico del agua, se ha tomado para todo caso 1 T/m<sup>3</sup>

$\Delta z$ : incremento de profundidad por encima del nivel freático

$\Delta z'$ : incremento de profundidad por debajo del nivel freático

### 4.3.6. Peso propio del pilote

Aunque algunos autores sostienen que debido al peso de las tierras desalojadas no es necesario considerar el peso del pilote para el cálculo de la carga de hundimiento, tenerlo en cuenta proporcionará resultados más inclinados hacia la seguridad. Para considerarlo ha de tenerse en cuenta tanto el área neta como el área encerrada del mismo<sup>12</sup>.

$$W_{\text{pilote}}(z) = A_{\text{real}} \cdot \gamma_{\text{pilote}} \cdot z + (A_{\text{encerrada}} - A_{\text{real}}) \cdot \sigma'_z$$

Se tiene en cuenta el peso de las tierras que quedan dentro del área encerrada. Aunque el efecto del nivel freático se contempla en la tensión efectiva se ha decidido no considerar el efecto del empuje hidrostático sobre el pilote. Aunque este criterio puede suponer una sobrevaloración de la resistencia al arranque en algunos casos, aportará una mayor seguridad en el resto.

---

<sup>11</sup> Véase Anexo I: Apartado 3.1

<sup>12</sup> Véase Anexo I: Apartado 3.9

### 4.3.7. Resistencia por punta

La resistencia unitaria por punta del terreno se define en función de la longitud del pilote, con los parámetros del estrato situado a dicha profundidad, forzando un valor nulo cuando se incumple la condición de la zona de influencia por punta<sup>13</sup>, tal y como se ha comentado en el epígrafe 4.2.3.

Por si se diese algún caso en que se considerase que este factor no debe ser tenido en cuenta, por ejemplo, en pilotes que sean diseñados para trabajar solamente por fuste, se ha introducido la opción de anularlo en contacto con suelos<sup>14</sup>.

### 4.3.8. Resistencia por fuste

La resistencia por fuste a una altura determinada se obtiene a base de sumar las resistencias parciales de los distintos estratos. En un tramo homogéneo la resistencia por fuste puede hallarse multiplicando la resistencia unitaria por fuste, hallada en función de la normativa escogida y el tipo de terreno, por el área del fuste<sup>15</sup>.

Esto significa que para hallar la total se deberá ir sumando las resistencias de los diferentes tramos homogéneos. Estos tramos se verán separados por los planos de límite entre estratos y por el nivel freático<sup>16</sup>.

Como se ha comentado en epígrafe 4.2.3, cuando la punta se sitúa en roca conviene no tener en cuenta la resistencia por fuste de los suelos que se sitúan sobre ella. Por ello se incluye la opción de obviar la resistencia por fuste en estratos granulares o cohesivos<sup>17</sup>.

### 4.3.9. Longitud óptima de pilote

La longitud óptima puede obtenerse mediante un proceso sencillo de iteraciones. Partiendo del axil sobre el pilote más cargado, obtenido a partir de las acciones sobre el encepado, los datos geométricos del mismo y la separación de pilotes.

---

<sup>13</sup> Véase Anexo I: Apartado 3.2

<sup>14</sup> Véase Manual de Usuario: Ajustes de Cálculo

<sup>15</sup> Véase Anexo I: Apartados 3.3.1-3.3.4 y 3.4.1-3.4.4

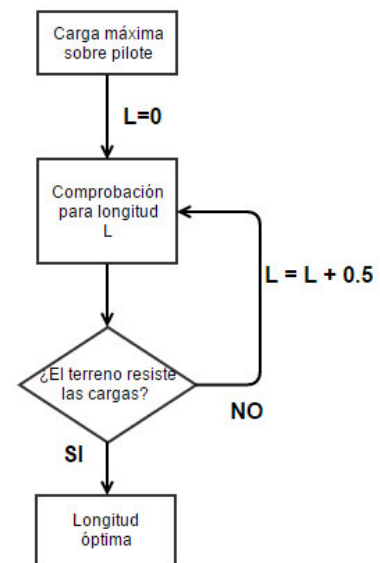
<sup>16</sup> Véase Anexo I: Apartados 3.3 y 3.4

<sup>17</sup> Véase Manual de Usuario: Ajustes de Cálculo

## Desarrollo

El procedimiento consiste en calcular la resistencia del terreno a intervalos regulares hasta que se cumple con factor de seguridad correspondiente<sup>18</sup>. La profundidad a la que se obtiene esa condición será la longitud mínima que cumpla con las condiciones.

Para este caso se ha optado por un incremento de longitud de cálculo de medio metro, dado que tomar unos intervalos menores podría proporcionar resultados no viables desde el punto de vista constructivo, que requiere de la adopción de medidas fácilmente interpretables.



**Ilustración 17:**  
**Dimensionamiento**

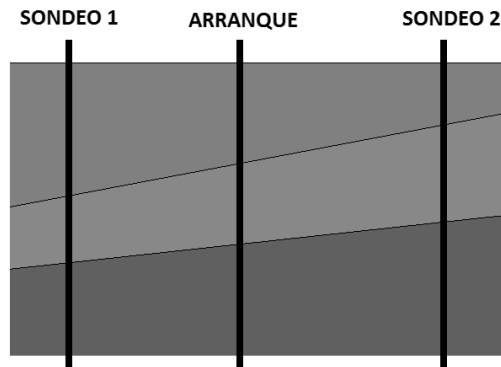
#### 4.3.10. Consideración de sondeos

En plantas de gran extensión puede darse el caso de que los distintos sondeos realizados durante la campaña geotécnica proporcionen distintos valores de profundidades o espesores de estratos, lo que podría repercutir en una diferencia, en ocasiones significativa, de la resistencia del terreno. En la mayoría de casos no serán de importancia, pero en situaciones en las que haya buzamientos pronunciados sería deseable considerarlas.

Por ello se ha incluido la posibilidad de introducir los datos de los distintos sondeos realizados, incluidas las coordenadas, y así poder interpolar los valores en ellos obtenidos para obtener los estratos en las posiciones de los arranques.

---

<sup>18</sup> Véase Anexo I: Apartado 3.12



**Ilustración 18: Influencia de los buzamientos**

Tomando como simplificación que los arranques se situarán sobre una superficie plana y horizontal, se podrán determinar los espesores y profundidades de los estratos bajo las posiciones de los distintos arranques por uno de los siguientes métodos.

- Emplear los datos del **sondeo más cercano**: es la opción más simple, y ofrecerá buenas aproximaciones siempre y cuando no haya arranques muy alejados de los puntos de sondeo.
- Interpolar linealmente entre los **dos sondeos más cercanos**
- Interpolar linealmente entre los **tres sondeos más cercanos**

Para realizar la interpolación se supone que los límites entre los estratos son planos. Todos los puntos de un plano, definido por tres puntos, han de cumplir la siguiente condición:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0$$

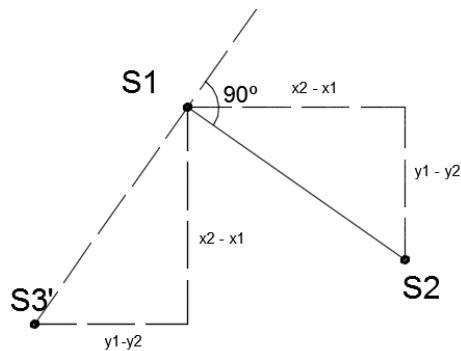
Por lo tanto, si se desea interpolar con tres sondeos, tomando los ejes de la planta como  $x$  e  $y$  y la profundidad como eje  $z$ , habrá que sustituir los datos de los puntos uno a tres por los datos de los sondeos e introducir como  $x$  e  $y$  las coordenadas del arranque a estudiar. Resolviendo el determinante se obtiene el valor de  $z$ , que será la profundidad del cambio de estratos en el arranque<sup>19</sup>.

---

<sup>19</sup> Véase Anexo I: Apartado 3.17.1

## Desarrollo

En caso de querer interpolar únicamente con dos arranques se supone que definen la recta de máxima pendiente del plano, con lo que para poder calcular la profundidad con el método descrito deberá definirse un tercer sondeo virtual<sup>20</sup>, de forma que:



**Ilustración 19: Interpolación con dos puntos**

$$x_3 = x_1 + y_2 - y_1$$

$$y_3 = y_1 + x_2 - x_1$$

$$z_3 = z_1$$

Así quedaría determinado un plano cuya recta de máxima pendiente está definida por los dos sondeos y sobre el que podría aplicarse el determinante para hallar la profundidad en el arranque.

Dado que el cálculo de la planta consiste en calcular una serie de encepados, deberán sustituirse los datos globales del terreno por los hallados para el arranque en cuestión antes de comenzar el dimensionamiento de los pilotes.

---

<sup>20</sup> Véase Anexo I: Apartado 3.17.2



## 4.4. OPTIMIZACIÓN DE UNA CIMENTACIÓN POR PILOTES

El objetivo de un ingeniero es y será siempre la obtención de la solución válida, en criterios de seguridad y servicio, que sea más económica, y el caso de las cimentaciones por pilotes no es una excepción. Aunque la experiencia del profesional influye mucho en este aspecto, dado que en problemas que engloban aspectos geotécnicos es muy difícil generalizar criterios, porque las características del terreno, diferentes para cada situación en concreto, pueden influir significativamente en los costes de ejecución, ya sea en forma de excesos de medición en caso de pilotes perforados, o de rechazo en caso de pilotes hincados.

Muchos de estos aspectos serán casi imposibles de determinar con precisión hasta que se comience la ejecución. Sin embargo, aunque no se consideren, mediante el planteamiento teórico puede realizarse un acercamiento lo suficientemente aproximado como para que sea válido.

### 4.4.1. *Procedimientos y algoritmos de optimización*

Se denomina optimización a la selección del mejor elemento de un conjunto de elementos disponibles. La más simple consiste en la maximización o minimización de una función matemática dentro de un rango.

A la hora de estudiar problemas más complejos este proceso mantiene su esencia, que es obtener el mejor valor posible en una función con múltiples variables, denominada comúnmente función objetivo, siempre que dicho valor se encuentre dentro de un rango válido, es decir, que cumpla con una serie de condiciones, denominadas de aptitud o de descarte. En estos casos, la combinación de variables que, cumpliendo con todas las condiciones, proporcione un valor máximo o mínimo, según el caso correspondiente, será la situación óptima.

A lo largo de la historia se han creado múltiples procedimientos de optimización destinados a resolver una gran variedad y casuística de problemas. Para este trabajo se han escogido aquellos que mejor se adaptan al problema planteado y que presen-

## Desarrollo

tan procedimientos simplificados que permitan una fácil implementación en el código de programación.

#### *4.4.2. El algoritmo de búsqueda por fuerza bruta y su aplicación a la optimización de arranques aislados*

Un arranque aislado presenta pocas variables con rango reducido en la mayoría de los casos, es por ello que para su procesamiento es de aplicación el tipo más básico de algoritmo de optimización, también denominado como optimización de búsqueda combinatoria por fuerza bruta.

Se ha escogido este tipo de algoritmo porque ofrece un método simple, presentando una programación sencilla, pero efectivo para hallar la solución más adecuada, ofreciendo una certeza absoluta, siempre que las funciones y las comprobaciones estén correctamente definidas. El proceso consiste en estudiar la función objetivo, en este caso el coste estimado, para cada una de las combinaciones posibles de las variables<sup>21</sup>.

Las **variables de la función objetivo**, en este caso el coste, serán las siguientes:

- **Pilote empleado**

Determinará la carga máxima que puede soportar y también condicionará las dimensiones del encepado.

En general no se suelen emplear más de 20 pilotes distintos para estudiar una optimización. Sin embargo, en el caso de micropilotes, las variables aumentan:

- Diámetro
- Tipo de inyección empleada: en función de su resistencia característica, que nunca ha de ser inferior a 25 MPa.

---

<sup>21</sup> Véase Anexo I: Apartado 5.1

- Armadura tubular empleada, en función de:
  - Tipo de acero a emplear. Según la Guía los más empleados comúnmente son los siguientes
    - S 235
    - S 275
    - S 355
    - S 420
    - S 460
  - Parámetros geométricos
    - Diámetro exterior
    - Espesor

Estos parámetros geométricos se han tomado de armaduras tubulares comerciales, obtenidas de documentos elaborados por profesionales del sector (Hernandez del Pozo, Ocete Ruiz, Lama Fernández, & Hernandez Garvayo, s/f).

Dext(mm)	e(mm)	A(mm <sup>2</sup> )
60,3	5	845
73	5,5	1160
73	7,5	1550
88,9	6,45	1660
88,9	7,5	1920
88,9	9,5	2300
101,6	9,5	2615
114,3	9,5	2990
114,3	16	4700
127	9,5	3340
127	13,5	4820
139,7	9,5	3700
139,7	12,5	4750
177,8	12,5	6037

**Tabla 25: Armaduras tubulares (Geotecnia del Sur)**

## Desarrollo

- Refuerzos mediante barras corrugadas, en función de:
  - Número de refuerzos
  - Acero empleado.
    - B 400
    - B 500

No se ha tomado como variable el diámetro de las barras de refuerzo, dado que eso supondría un incremento inadmisibles de combinaciones posibles. En su lugar se supone que tendrán siempre un diámetro de 25, elección usual en la práctica, y que su número oscilará entre 0 y 3.

En caso de micropilotes, y considerando las combinaciones entre los parámetros definidos, pueden llegar a plantearse optimizaciones con hasta 5000 tipos de pilotes distintos, por lo que de no hacerse una acotación rigurosa de los mismos podría suponer un número de combinaciones excesivo para este tipo de optimización.

- **Disposición de los pilotes** en cada arranque  
La disposición de los pilotes en un arranque determinará el reparto de cargas, y por tanto, las máximas que soportará un pilote individualmente. Para ello se han determinado los parámetros geométricos de las distribuciones más empleadas, como se muestran en el epígrafe 4.3.1.
- **Separación entre ejes** de los pilotes  
Esta es una variable dependiente del diámetro, cuyos valores oscilarán entre 1 y 3 diámetros, pudiendo aumentarse este rango si se considera necesario.

\*Nótese que no se ha incluido la longitud de los pilotes para cada arranque como variable. Esto se debe a que dicha longitud se dimensionará y ajustará para cada caso, no formando parte del análisis combinatorio estrictamente, al menos en primera instancia. Sí que se puede considerar como variable el incremento de la longitud a partir de la misma, aspecto que se tendrá en cuenta para la optimización de la planta.

La función de coste se ha dividido en el coste de los materiales de los pilotes y el encepado y en los costes de maquinaria, personal y equipos auxiliares.

- **Coste de materiales**<sup>22</sup>

El coste de materiales empleados es sencillo de obtener, y consiste en calcular las mediciones de los mismos y multiplicarlas por su precio unitario. Para el caso del hormigón armado será necesario considerar además la cuantía de armadura que llevará cada elemento. Sin embargo, en el caso de los pilotes hormigonados in situ es necesario además considerar que no siempre se arman en toda su longitud, a no ser que se vayan a producir esfuerzos horizontales importantes que puedan provocar su rotura por flexión o por cortante. De no ser este el caso, algunos autores recomiendan armar hasta una profundidad de 6 metros o 9 diámetros, lo suficiente como para que se absorban los esfuerzos y se asegure la correcta conexión con el encepado.

$$C_{\text{arranque}} = C_{\text{pilotes}} + C_{\text{encepado}}$$

$$C_{\text{pilotes}} = n \cdot A_{\text{pilote}} \cdot (P_{\text{material}} \cdot L_{\text{pilote}} + P_{\text{armaduras}} \cdot L_{\text{armada}} \cdot \rho_{\text{pilote}})$$

$$C_{\text{encepado}} = A_{\text{encepado}} \cdot h \cdot (P_{\text{hormigón}} + P_{\text{armaduras}} \cdot \rho_{\text{encepado}})$$

**C<sub>arranque</sub>**: coste de materiales del arranque

**C<sub>pilotes</sub>**: coste de los materiales de los pilotes

**C<sub>encepado</sub>**: coste de los materiales del encepado

**n**: número de pilotes en el arranque

**h**: canto del encepado

**A<sub>encepado</sub>**: área del encepado

**A<sub>pilote</sub>**: área neta de la sección transversal del pilote

**P<sub>material</sub>**: precio del material del pilote

**P<sub>hormigón</sub>**: precio del hormigón del encepado

**P<sub>armaduras</sub>**: precio del acero de armaduras

**L<sub>pilote</sub>**: longitud total del pilote

**L<sub>armada</sub>**: longitud del pilote armada

**ρ<sub>pilote</sub>**: cuantía de armaduras en la longitud armada del pilote

**ρ<sub>encepado</sub>**: cuantía de armaduras en el encepado

No se considerarán los posibles aumentos de medición en pilotes in situ y micro-pilotes producidos durante la perforación, dado que para su aproximación deberían tenerse en cuenta aspectos geotécnicos más complejos y requeriría un estudio mucho

---

<sup>22</sup> Véase Anexo I: Apartado 4

## Desarrollo

más extenso de obras ejecutadas. Por tanto se adopta la simplificación de emplear el diámetro nominal.

- **Coste de ejecución**

Para una correcta implementación de los costes de ejecución, es decir, los debidos a la maquinaria, personal y elementos auxiliares es necesario expresarlos en función del tipo de pilote empleado<sup>23</sup>. Para ello ha de estudiarse por un lado el coste de la hinca de pilotes prefabricados, por otro el coste de perforación de pilotes in situ y aparte el de la ejecución de los micropilotes.

Para ello se han consultado diversas bases de precios de diferentes instituciones oficiales, específicamente la de la Dirección General de Carreteras (2016), la de la Junta de Andalucía (2016), la de la Junta de Castilla y León (2015), la del Gobierno de Extremadura y la del Colegio de arquitectos de Guadalajara (2012). Además se han obtenido datos por parte de una empresa especializada en la materia.

De ellas se ha analizado la información y se han obtenido los siguientes costes para los distintos procedimientos de perforación en función del diámetro.

Ha de considerarse también que la máquina debe reposicionarse entre perforaciones de pilotes, factor que influye notablemente en el coste. Este factor se va a introducir como una cantidad fija por cada pilote que haya de ejecutarse en el encepado.

$$C_{\text{ejecución}} = (C_{\text{metro lineal}} \cdot L + C_{\text{reposicionamiento}}) \cdot N_{\text{pilotes}}$$

Este coste se ha introducido como valor fijo para todos los diámetros y tipos de ejecución. Sin embargo, sería más correcto el considerar que varía a intervalos de diámetros, dado que para mayores diámetros se emplearán máquinas más voluminosas que tendrán un coste mayor por hora y que además requerirán más tiempo para reposicionarse correctamente. Dado que requeriría un estudio mucho más amplio y exhaustivo el considerar correctamente esta cuestión se deja pendiente para futuras actualizaciones.

---

<sup>23</sup> Véase Anexo I: Apartado 4

## CPI-2

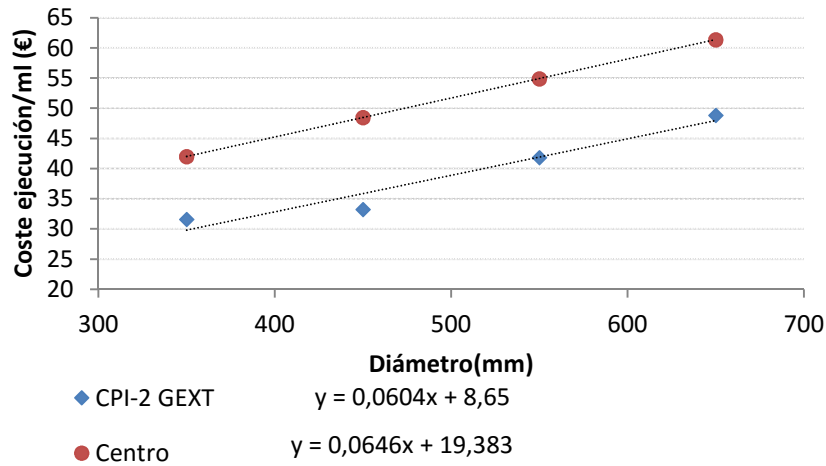


Ilustración 20: Rectas Coste/Diámetro CPI-2

## CPI-3

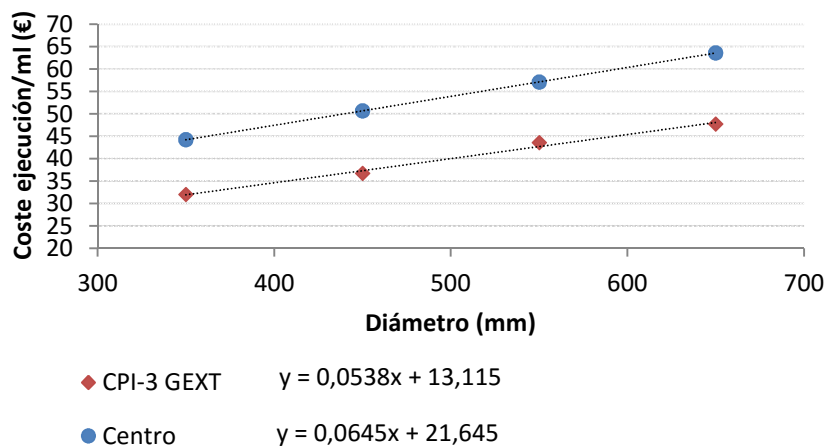


Ilustración 21: Rectas Coste/Diámetro CPI-3

## CPI-4

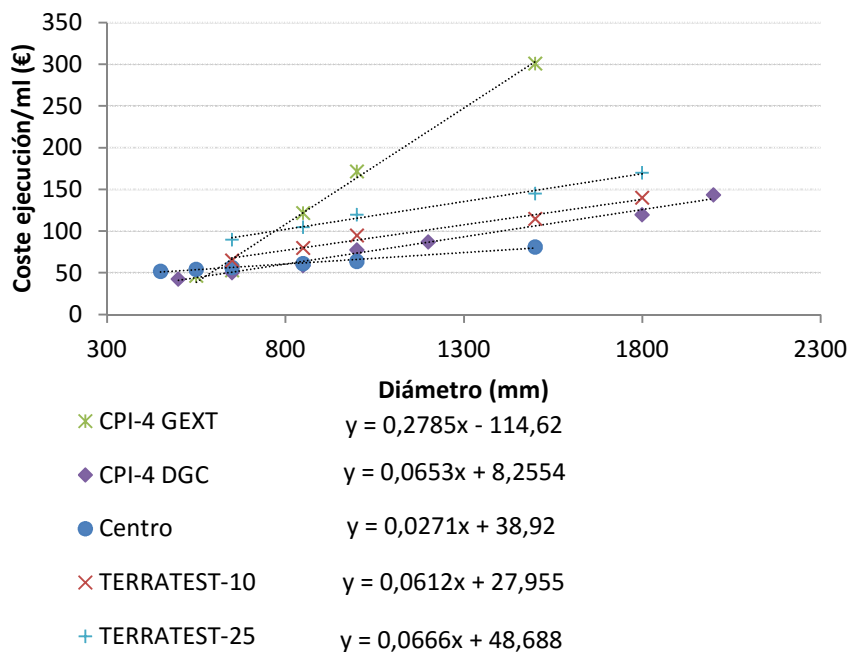


Ilustración 22: Rectas coste/Diámetro CPI-4

## CPI-5

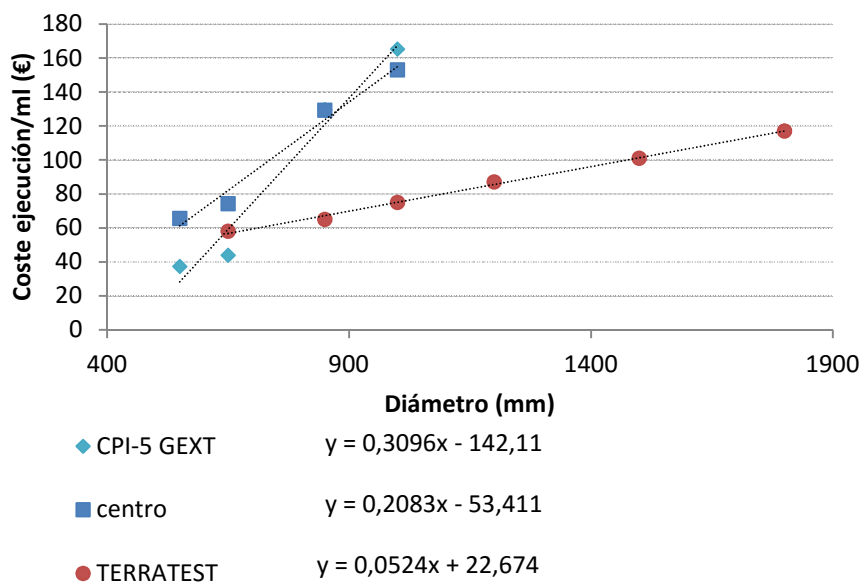
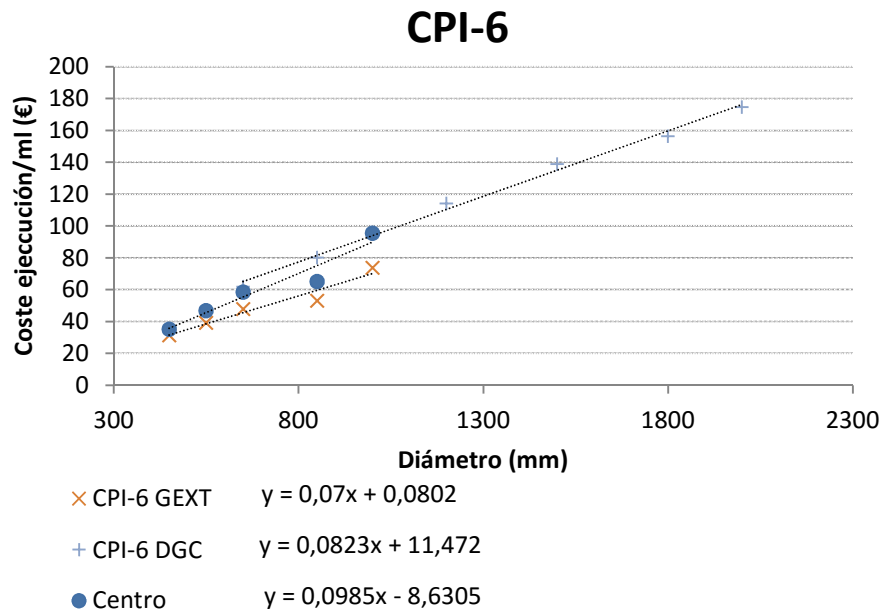
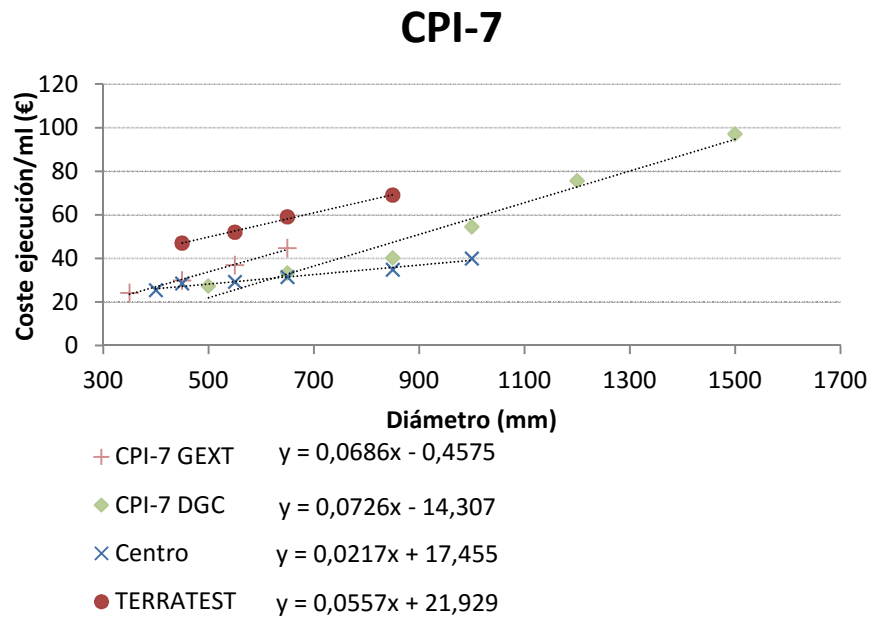


Ilustración 23: Rectas coste/Diámetro CPI-5



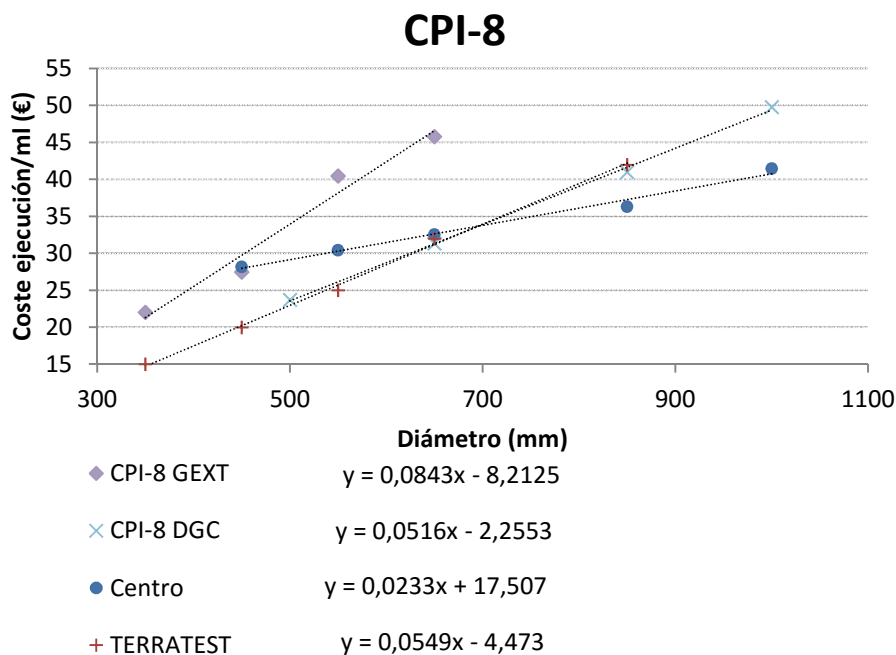


**Ilustración 24: Rectas coste/Diámetro CPI-6**



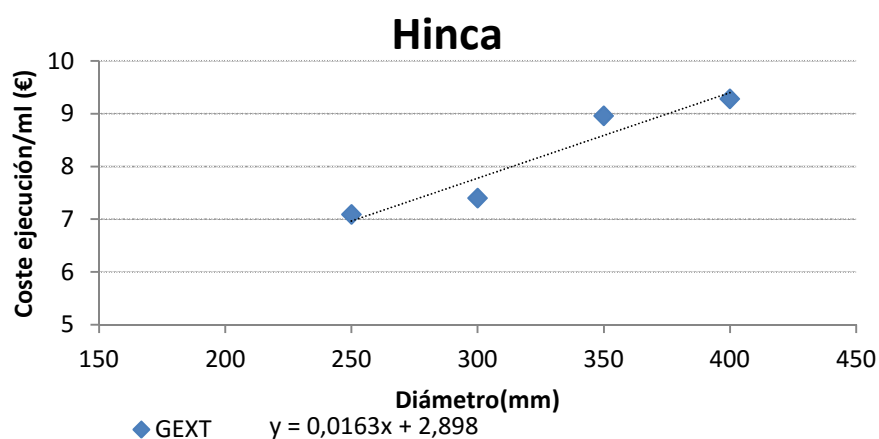
**Ilustración 25: Rectas coste/Diámetro CPI-7**

Desarrollo



**Ilustración 26: Rectas coste/Diámetro CPI-8**

Con estos datos no solo se han obtenido los parámetros de la función lineal del coste en función del diámetro, sino también los límites del intervalo en el que es de aplicación cada una. De esta manera se podrá considerar con relativa precisión el coste, evitando soluciones incoherentes que podrían darse para determinadas combinaciones de diámetros y procedimientos.

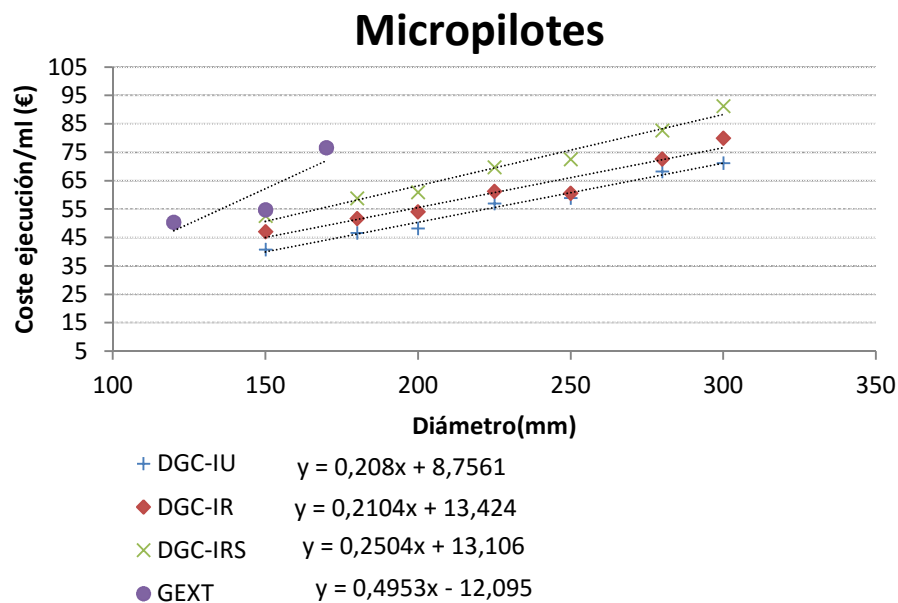


**Ilustración 27: Rectas coste/Diámetro Hinca**

La función de precio de la hinca es más compleja de considerar, ya que en las bases de precios se tiende a incluir el precio de la maquinaria dentro del precio del pilote en sí, que en este documento se calcula mediante precio de materiales. Aun así, considerando el resto de gastos se ha obtenido otra función, que será de aplicación en un rango de diámetros muy inferior al de las funciones de coste de los pilotes perforados, dado que el rango de diámetros de pilotes hincados es reducido.

Dado la baja frecuencia de uso de pilotes metálicos o de madera no se han podido encontrar datos sobre su coste de hinca, con lo que, estrictamente, solamente sería correcto emplear dicha función para el caso de pilotes de hormigón prefabricados.

El coste de perforación de micropilotes se ha obtenido análogamente a los costes de perforación de pilotes in situ. Dado que muchos catálogos proporcionan el precio del pilote en función de su capacidad portante, únicamente se han tomado aquellos que lo definían especificando su diámetro.



#### Ilustración 28: Rectas coste/Diámetro Micropilotes

El único aspecto que no se ha considerado afectaría al cálculo de la planta, y se trata de la implementación del equipo en obra. Al ser similar para todos los tamaños de pilotes, y que se imputaría en todo caso, se considera que no influiría.

### ***4.4.3. Comprobaciones individuales a realizar***

Para cada combinación se llevarán a cabo una serie de comprobaciones que determinarán si es válida o no. Estas comprobaciones son las determinadas en las normativas consultadas.

- Tope estructural
- Resistencia al hundimiento
- Resistencia al arranque
- ELU cortante
- ELU flexión

Dado que las comprobaciones relativas a esfuerzos horizontales se han obviado debido a que tienen una relevancia secundaria en el cálculo de este tipo de tipología y a que para su compensación se suele recurrir a variaciones que se salen del ámbito del programa (Véase epígrafe 4.2.3).

El resto de comprobaciones se llevan a cabo dentro del procedimiento de dimensionamiento de longitud del pilote<sup>24</sup>, en el que básicamente se descartan aquellas que no cumplen con la condición de tope estructural y se determina la longitud mínima, u óptima, en cada caso, para que cumpla con la resistencia al hundimiento del terreno.

### ***4.4.4. Los algoritmos heurísticos y su aplicación a la optimización de plantas de cimentación***

Es muy improbable que un profesional necesite calcular un único arranque. Lo habitual será que necesite calcular el todos los que compongan su estructura, pero con más profundidad que considerándolos como una serie de entes individuales. Tendrá que tenerse en cuenta que forman un todo, que es el que deberá estudiarse para obtener el coste total mínimo.

---

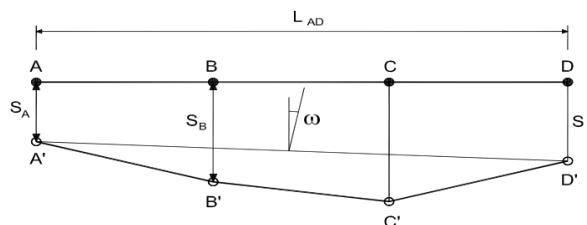
<sup>24</sup> Véase Anexo I: Apartado 3.12

Para realizar la optimización de un conjunto de elementos, en este caso encajados, deben considerarse las comprobaciones o limitaciones globales que deberán imponerse.

Una de las limitaciones a considerar será el número de tipos de pilotes diferentes a emplear, entendiendo por diferente que tengan distinta sección transversal. Esta limitación surge de la extendida costumbre de emplear el mismo tipo de pilote en toda la planta, dado que utilizar más de uno conllevaría gastos adicionales según si hubiese que emplear distinta maquinaria, cambiar las barrenas para perforaciones, etc.

Sin embargo, en plantas de gran extensión y en las que se desee aprovechar al máximo el material suele ser rentable el empleo de dos o de incluso tres tipos distintos de pilotes. El programa permite realizar el cálculo de optimización tanto para uno como para dos pilotes.

Aparte, ha de comprobarse que toda la planta cumple con el Estado Límite de Servicio de asientos diferenciales, de forma que la distorsión angular entre arranques debida a sus asientos no supere el límite establecido en la norma para cada tipo de proyecto. Aunque los asientos en el caso de cimentaciones pilotadas son mínimos, pueden darse ciertas situaciones en que no se cumpla esta condición.



**Ilustración 29: Distorsiones angulares (CTE)**

Al realizar la optimización de varios arranques como un conjunto se alcanzan unas magnitudes de iteraciones de cálculo que dejan de ser compatibles con las comprobaciones por fuerza bruta, con lo que es necesario realizar la optimización dividiendo el problema en fases.

La primera fase, o **fase de generación**, consiste en optimizar la planta sin tener en cuenta la comprobación de distorsiones angulares. Puede realizarse optimizando primero cada arranque para cada pilote y hallando después la combinación que da el coste mínimo, teniendo en cuenta el número de pilotes a emplear. En caso de que sean dos pilotes realizará la comprobación dos a dos, es decir, todas las combinacio-

## Desarrollo

nes. Sería, por lo tanto, una doble optimización por fuerza bruta, que ofrecería un valor mínimo.

La segunda fase, o **fase de corrección**, modificará los arranques necesarios para eliminar todas aquellas distorsiones angulares que superen la máxima establecida, mediante un algoritmo de optimización heurística.

La optimización heurística consiste en un procedimiento que permite hallar un óptimo local, pero que no ofrece garantías de que éste sea el óptimo global. A cambio representa un esfuerzo computacional menor, ya que realiza muchas menos iteraciones que las optimizaciones por fuerza bruta como la que se ha empleado para el caso de encepados aislados.

Dentro de este tipo de optimizaciones existen los llamados algoritmos genéticos, que consisten en modificar varios de los parámetros generando una serie de "descendientes" de la situación original y comprobar cuál de ellos es el más apto. Aquel que lo sea se convertirá en el "padre" la siguiente iteración o "generación" en la situación original. En caso de llegar a un punto en que ninguna de las modificaciones presenta mejoras respecto al original se habrá llegado al óptimo local.

Para la situación estudiada se han planteado los siguientes criterios:

- Solo habrán de realizarse modificaciones en la planta en el caso de que la distorsión angular máxima supere el límite establecido para el proyecto.
- Dado que la planta original de primera generación es la óptima globalmente, la modificación de cualquiera de los arranques de la misma conllevará un aumento del coste, por lo que debe intentarse modificar el menor número posible de ellos.

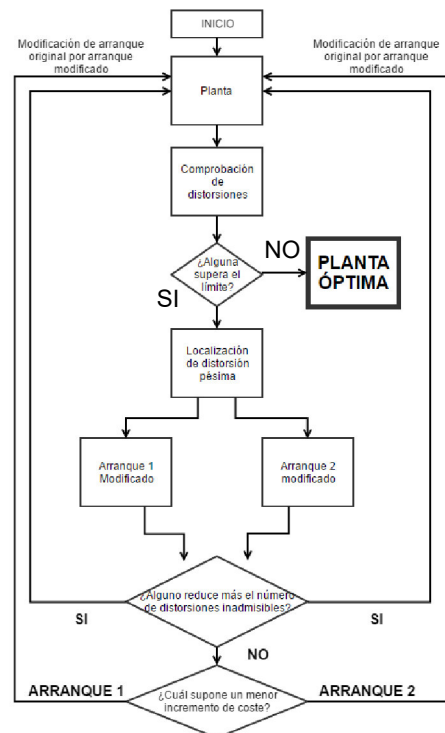
El procedimiento seguirá los siguientes pasos<sup>25</sup>:

- 1) Determinación de los dos arranques que presentan una **mayor distorsión angular** entre ellos y comprobar si es mayor que el límite establecido.

---

<sup>25</sup> Véase Anexo I: Apartado 5.4

- 2) Estudiar la **modificación individual** de cada uno de esos dos arranques que corregiría dicha distorsión y que reduciría al máximo el número de distorsiones angulares en toda la planta que superen el límite establecido. En caso de que la modificación de ambas modificaciones presentasen idéntica disminución se tomaría aquella con menor coste.
- 3) **Sustituir** el arranque original por el arranque modificado escogido.
- 4) Determinar la **siguiente distorsión** angular entre arranques que no cumpla con la limitación y repetir el proceso.



**Ilustración 30: Corrección de distorsiones**

## 4.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INTERFAZ CREADA

En este apartado se van a comentar todos aquellos criterios que se han seguido durante el desarrollo de la estructura y la interfaz del programa, complementando a todo lo especificado en anteriores apartados.

Para una mejor comprensión conviene consultar el Anexo II, que consiste en el Manual de Usuario del programa, y que incluye explicaciones más extensas sobre las características de cada formulario creado.

### 4.5.1. *Visual Basic para aplicaciones en base Excel: Ventajas e inconvenientes*

El programa se ha desarrollado mediante formularios de Visual Basic para aplicaciones dentro de un libro de Microsoft Excel 2010, introduciendo las fórmulas en forma de macros y funciones y almacenando datos tanto en celdas de las hojas como dentro del código.

Se ha escogido este formato porque, al llevar ya incorporados las distintas opciones de menú en los formularios que pudieran necesitarse, reduce considerablemente el tiempo de desarrollo. Además, es un entorno familiar para todo usuario del programa y el libro incluye de por sí opciones de guardado y de impresión, con lo que quedarían cubiertas la mayoría de necesidades básicas, permitiendo así dedicar más tiempo al desarrollo del código.

Sin embargo, el lenguaje de Visual Basic en Excel no está pensado para la realización de un gran número de iteraciones y tiende a bloquearse con frecuencia cuando se le exige demasiado, con lo que no es el más idóneo para la realización de cálculos de optimización tan extensos como algunos de los que son objeto de este Trabajo. Además es incapaz de almacenar datos en sí mismo entre distintas sesiones de uso, con lo que se debe recurrir a las celdas del libro, cuya interacción con el código ralentiza enormemente la velocidad de operación, al requerir más esfuerzo computacional que operar meramente en base a código.



### *4.5.2. Introducción de Datos y Opciones de ajuste: Flexibilidad contra Rigidez*

Uno de los objetivos principales a la hora de crear un programa es lograr el equilibrio óptimo entre flexibilidad y rigidez del mismo. Esto es, buscar la solución que mejor se adapte tanto al usuario como al desarrollador.

Como la mayoría de la gente se sitúa dentro de la categoría de usuarios, el pensamiento general es que una mayor flexibilidad siempre será mejor, dado que así podrá efectuar más tareas distintas y adaptar al máximo el programa al proyecto que desarrolle. Sin embargo, esa mayor libertad de uso repercute en una labor más compleja del desarrollador, que tendrá que dedicar más tiempo a elaborar código para descartar o corregir posibles situaciones erróneas que puedan surgir, lo que implica una mayor posibilidad de que se produzcan errores y, en caso de programas comerciales, un aumento del coste para compensar el aumento de tiempo de dedicación.

Por otra parte, una rigidez excesiva conllevaría una reducción del rango de situaciones en que el programa sería de aplicación, pero a su vez los resultados serían más seguros.

Es por ello crucial la búsqueda de las opciones que mejor satisfagan a ambas partes. En este caso se ha optado por una situación aproximadamente intermedia orientada ligeramente hacia la flexibilidad. Esto implica que pueden quedar algunos errores menores que hayan pasado inadvertidos durante las fases de desarrollo y revisión. Además hay partes que en las que, debido a que habría supuesto un gran incremento en el tiempo de desarrollo introducir las condiciones de invalidez, se ha optado en su lugar por comentar dichas condiciones en el Manual de Usuario, de forma que puedan tenerse en cuenta y evitarse.

### *4.5.3. Simplificación de uso*

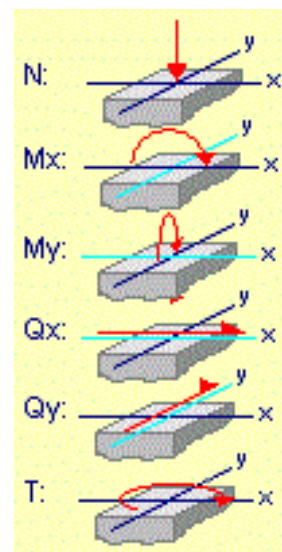
La simplicidad de la interfaz ha sido un aspecto que se ha tenido en consideración durante el desarrollo, dado que el programa debe presentarse al usuario de manera que le resulte sencillo, intuitivo, y cómodo de utilizar.

## Desarrollo

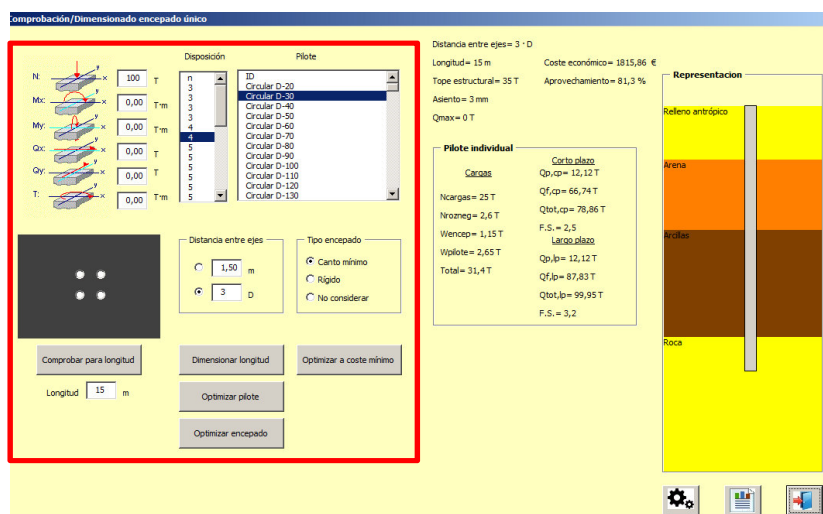
Esto se ha conseguido, entre otros aspectos, empleando iconos que resulten familiares a la mayoría de la gente, como por ejemplo el símbolo de lápiz para la edición, el de engranaje para los ajustes o el de la puerta para salir, de forma que puedan interpretar la mayoría de funciones que realiza cada elemento sin necesidad de consultar el manual y sin haber utilizado el programa con anterioridad.

También conviene indicar mediante esquemas el significado de algunos datos a introducir, para evitar confusiones que pudiesen derivar en imprecisiones o errores de cálculo. En este sentido se ha seguido el ejemplo de otras casas comerciales.

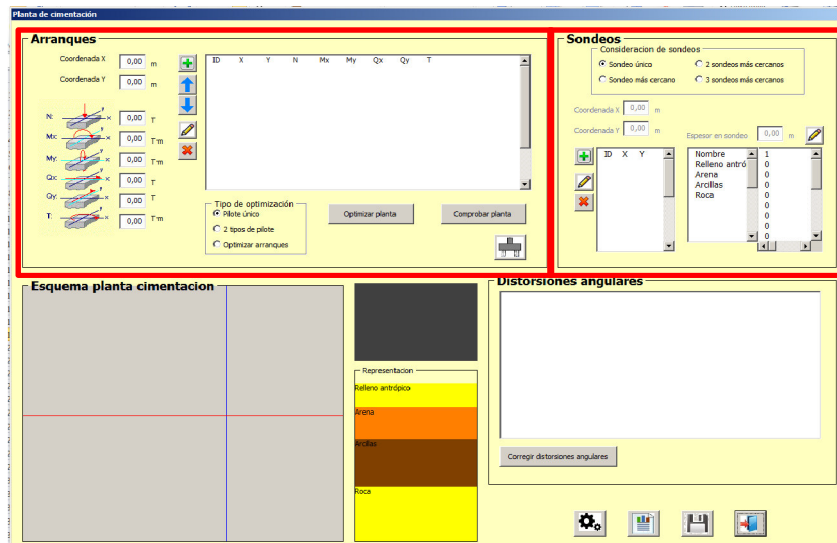
La comodidad de manejo se logra organizando los formularios de forma que no supongan esfuerzo, por ejemplo, evitando que el usuario tenga que estar cruzando la pantalla con el puntero del ratón constantemente. Para evitarlo se han dispuesto la mayoría de elementos interactivos relacionados, siempre que fuese necesario, concentrados en una zona del formulario. Además, ofreciendo la posibilidad de guardar los datos que se introducen, se evita la necesidad de volver a escribirlos y validarlos cada vez que se inicia el programa. Siendo la introducción de datos posiblemente el aspecto más tedioso del trabajo con programas de cálculo, conviene aliviar esta tarea lo máximo posible.



**Ilustración 31:**  
Cargas en arranque  
(CYPE Ingenieros)



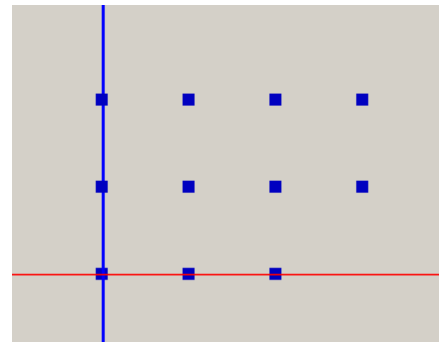
**Ilustración 32: Concentración de elementos interactivos – arranque aislado**



**Ilustración 33: Concentración de los elementos interactivos-planta**

#### 4.5.4. Representaciones visuales

La representación visual, siempre que sea viable, de los datos introducidos, es fundamental para poder cerciorarse de que los datos se están introduciendo correctamente. Por ello se han añadido ventanas gráficas dinámicas, es decir, que se actualizan automáticamente cuando cambian los valores, en todos aquellos formularios en que se ha considerado necesario.



**Ilustración 34: Arranques en planta**

Se han empleado para representar:

- **Disposiciones de pilotes en los encepados:** de esta forma el usuario puede asegurarse de que las coordenadas introducidas, tanto en número como en magnitud, son correctas. Cobra especial importancia a la hora de introducir encepados en los que haya una cantidad importante de pilotes.
- **Estratos del terreno<sup>26</sup>:** de esta forma hay certeza de que los espesores introducidos son los que corresponden, además de que la posición del freático es la correcta.

<sup>26</sup> Véase Manual de Usuario: Datos terreno

## Desarrollo



**Ilustración 35:**  
**Pilote en terreno**

- **Pilote dentro del terreno<sup>27</sup>**: así permite visualizar el resultado de los cálculos. Fundamental para conocer como aporta resistencia cada estrato.

- **Arranques en planta<sup>28</sup>**: visualizando la posición respecto a los ejes se evitan errores de definición de los mismos, además de que permite visualizar cual se ha seleccionado en la tabla superior.

---

<sup>27</sup> Véase Manual de Usuario: Arranque aislado

<sup>28</sup> Véase Manual de Usuario: Cálculo de planta

## 4.6. EJEMPLOS PRÁCTICOS

En este apartado se van a desarrollar una serie de ejemplos simplificados de diversas situaciones sencillas, para la comprobación de la validez de los cálculos de resistencia al hundimiento del programa.

### 4.6.1. Código técnico de edificación

#### Lista de estratos:

- **Relleno antrópico:** 0-3 m ; Densidad= 1,7 T/m<sup>3</sup>
- **Arenas:** 3-7 m ; Densidad= 1,9 T/m<sup>3</sup>  $\varphi=30^\circ$
- **Arcilla:** 7-13 m ; Densidad= 2 T/m<sup>3</sup>  $\varphi=30^\circ$   
cu=200KPa
- **Roca:** 13-21 m ;  $q_u=450$  T/m<sup>2</sup> s=200 mm a=4 mm

#### Longitud de pilote: 18 metros

#### Pilote circular in situ de diámetro D=0,5 m

- Área=0,2 m<sup>2</sup>
- Perímetro=1,57 m

#### **Resistencia por fuste:**

##### **Arena**

$$\tau_f = K_f \cdot \sigma'_v \cdot f \cdot \operatorname{tg}(\varphi) \leq 120 \text{ KPa}$$

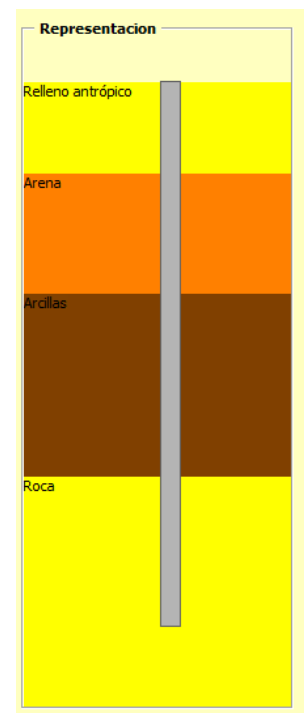
$$\tau_f = 0,75 \cdot (3 \cdot 1,7 + 2 \cdot 1,9) \cdot 1 \cdot \operatorname{tg}(30) = 3,85 \text{ T/m}^2$$

$$Q_f = 3,85 \cdot 1,57 \cdot 4 = 24,2 \text{ T}$$

##### **Arcilla**

##### **Corto plazo**

$$\tau_f = \frac{100 \cdot c_u}{100 + c_u}$$



Desarrollo

$$\tau_f = \frac{100 \cdot 200}{100 + 200} \cdot 0,1 = 6,67 \text{ T/m}^2$$

$$Q_f = 6,67 \cdot 1,57 \cdot 6 = 62,8 \text{ T}$$

**Largo plazo**

$$\tau_f = K_f \cdot \sigma'_v \cdot f \cdot \text{tg}(\varphi) \leq 120 \text{ KPa}$$

$$\tau_f = 0,75 \cdot (3 \cdot 1,7 + 4 \cdot 1,9 + 3 \cdot 2) \cdot 1 \cdot \text{tg}(30) = 8,1 \text{ T/m}^2$$

$$Q_f = 8,1 \cdot 1,57 \cdot 6 = 76,3 \text{ T}$$

**Empotramiento en roca****Punta**

$$q_{p,d} = \frac{3 + \frac{s}{D}}{10 \sqrt{1 + 300 \frac{a}{s}}} \cdot q_u \cdot D \cdot d_f$$

$$q_{p,d} = \frac{3 + \frac{200}{500}}{10 \sqrt{1 + 300 \frac{4}{200}}} \cdot 450 \cdot 0,5 \cdot 3 = 86,7 \text{ T/m}^2$$

$$Q_p = 86,7 \cdot 0,2 \cdot 3 = 52 \text{ T}$$

**Fuste**

$$\tau_{f,d} = 0,2 \cdot \sqrt{q_u}$$

$$\tau_{f,d} = 0,2 \cdot \sqrt{0,1 \cdot 450} \cdot 100 = 42,46 \text{ T/m}^2$$

$$Q_f = 42,46 \cdot 1,57 \cdot 5 \cdot 3 = 998,5 \text{ T}$$

**Resistencia total:**Punta: **52 T**Fuste(corto plazo): **24,2+62,8+998,5=1085,5 T**Fuste(largo plazo): **24,2+76,3+998,5=1099 T****Corto plazo**

$$Q_{p,cp} = 51,1 \text{ T}$$

$$Q_{f,cp} = 1086,84 \text{ T}$$

$$Q_{tot,cp} = 1137,93 \text{ T}$$

$$F.S. = 11,1$$

**Largo plazo**

$$Q_{p,lp} = 51,1 \text{ T}$$

$$Q_{f,lp} = 1100,32 \text{ T}$$

$$Q_{tot,lp} = 1151,42 \text{ T}$$

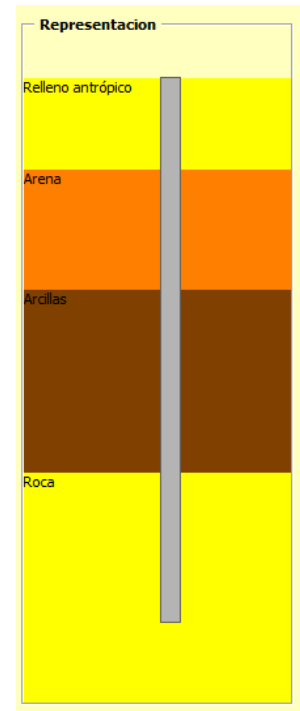
$$F.S. = 11,1$$

Los resultados ofrecidos por el programa son suficientemente aproximados, con un error que puede atribuirse al redondeo de los cálculos manuales.

## 4.6.2. Guía de cimentaciones en obras de carretera

### Lista de estratos:

- **Relleno antrópico:** 0-3 m ; Densidad= 1,7 T/m<sup>3</sup>
- **Arenas:** 3-7 m ; Densidad= 1,9 T/m<sup>3</sup> ;  $\phi=30^\circ$  ;  $c=0$  KPa ;  $k_0=0,3$  ;  $\delta=45^\circ$
- **Arcilla:** 7-13 m ; Densidad= 2 T/m<sup>3</sup>  $\phi=30^\circ$   $c_u=200$ KPa;  $c=50$ KPa;  $k_0=0,5$  ;  $\delta=40^\circ$
- **Roca:** 13-21 m ;  $q_u=450$  T/m<sup>2</sup>  $s=300$  mm RQD=75%



### Longitud de pilote: 18 metros

### Pilote in situ de diámetro D=0,5 m

- Área=0,2 m<sup>2</sup>
- Perímetro=1,57 m

### **Resistencia por fuste:**

#### **Arena**

$$\tau_f = (c + K_o \cdot \text{tg}(\delta) \cdot \sigma'_v) \cdot m \leq 90 \text{ kPa}$$

$$\tau_f = (0 + 0,3 \cdot \text{tg}(45) \cdot (3 \cdot 1,7 + 2 \cdot 1,9)) \cdot 1 = 2,67 \text{ T/m}^2$$

$$Q_f = 2,67 \cdot 1,57 \cdot 4 = 16,77 \text{ T}$$

#### **Arcilla**

#### **Corto plazo**

$$\tau_f = \frac{100 \cdot c_u}{100 + c_u}$$

$$\tau_f = \frac{100 \cdot 200}{100 + 200} \cdot 0,1 = 6,67 \text{ T/m}^2$$

$$Q_f = 6,67 \cdot 1,57 \cdot 6 = 62,8 \text{ T}$$

Desarrollo

**Largo plazo**

$$\tau_f = (c + K_o \cdot \operatorname{tg}(\delta) \cdot \sigma'_v) \cdot m \leq 90 \text{ kPa}$$

$$\tau_f = (5 + 0,5 \cdot \operatorname{tg}(40)) \cdot (3 \cdot 1,7 + 4 \cdot 1,9 + 3 \cdot 2)) \cdot 1 = 12,85 \text{ T/m}^2 \rightarrow 9 \text{ T/m}^2$$

$$Q_f = 9 \cdot 1,57 \cdot 6 = 84,8 \text{ T}$$

**Empotramiento en roca****Punta**

$$q_p = 2 \cdot d_f \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \sqrt{q_u} \leq 20 \text{ MPa}$$

$$q_p = 2 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 0,3 \sqrt{0,01 \cdot 450} = 254,6 \text{ T/m}^2$$

$$Q_p = 254,6 \cdot 0,2 = 51 \text{ T}$$

**Fuste**

$$\tau_f = 0,1 \cdot q_p \leq 2 \text{ MPa}$$

$$\tau_f = 0,1 \cdot 254,6 = 25,5 \text{ T/m}^2$$

$$Q_f = 25,5 \cdot 1,57 \cdot 5 = 200,2 \text{ T}$$

**Resistencia total:**Punta: **51** TFuste(corto plazo): **16,77+62,8+200,2=279,77** TFuste(largo plazo): **16,77+84,8+200,2=301,77** T**Corto plazo**

Qp,cp= 49,98 T

Qf,cp= 279,57 T

Qtot,cp= 329,56 T

F.S.= 8,3

**Largo plazo**

Qp,lp= 49,98 T

Qf,lp= 301,57 T

Qtot,lp= 351,55 T

F.S.= 9,1

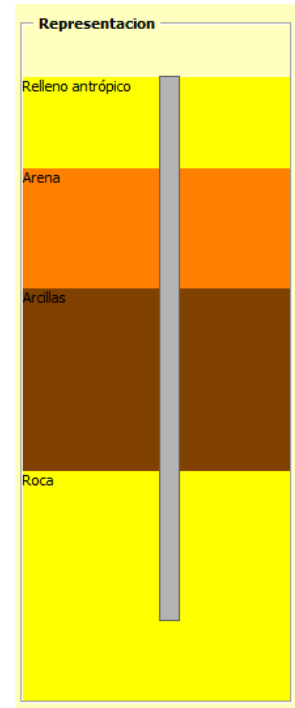
Los resultados ofrecidos por el programa son suficientemente aproximados, con un error que puede atribuirse al redondeo de los cálculos manuales.



### 4.6.3. Recomendaciones para obras marítimas

#### Lista de estratos:

- **Relleno antrópico:** 0-3 m ; Densidad= 1,7 T/m<sup>3</sup>
- **Arenas:** 3-7 m ; Densidad= 1,9 T/m<sup>3</sup> ;  $\varphi=30^\circ$ ;  $c=0$  KPa ;  $k_0=0,3$  ;  $\delta=45^\circ$
- **Arcilla:** 7-13 m ; Densidad= 2 T/m<sup>3</sup>  $\varphi=30^\circ$   $c_u=200$ KPa;  $c=50$ KPa;  $k_0=0,5$  ;  $\delta=40^\circ$
- **Roca:** 13-21 m ;  $q_u=450$  T/m<sup>2</sup> ;  $f_A=0,7$   $s=200$  mm;  $a=4$  mm RQD=75%



#### Longitud de pilote: 18 metros

#### Pilote in situ de diámetro D=0,5 m

- Área=0,2 m<sup>2</sup>
- Perímetro=1,57 m

#### **Resistencia por fuste:**

##### **Arena**

$$\tau_f = K \cdot \sigma'_v \cdot f \cdot \operatorname{tg}(\varphi) \leq 70 \text{ kPa}$$

$$\tau_f = 0,5 \cdot (3 \cdot 1,7 + 2 \cdot 1,9) \cdot 1 \cdot \operatorname{tg}(30) = 2,57 \text{ T/m}^2$$

$$Q_f = 2,57 \cdot 1,57 \cdot 4 = 16,1 \text{ T}$$

##### **Arcilla**

##### **Corto plazo**

$$\tau_f = \frac{100 \cdot c_u}{100 + c_u}$$

$$\tau_f = \frac{100 \cdot 200}{100 + 200} \cdot 0,1 = 6,67 \text{ T/m}^2$$

$$Q_f = 6,67 \cdot 1,57 \cdot 6 = 62,8 \text{ T}$$

Desarrollo

**Largo plazo**

$$\tau_f = K \cdot \sigma'_v \cdot f \cdot \text{tg}(\varphi) + c$$

$$\tau_f = 0,5 \cdot (3 \cdot 1,7 + 4 \cdot 1,9 + 3 \cdot 2) \cdot 1 \cdot \text{tg}(30) + 5 = 10,4 \text{ T/m}^2$$

$$Q_f = 10,4 \cdot 1,57 \cdot 6 = 98 \text{ T}$$

**Empotramiento en roca****Punta**

$$q_p = \frac{2}{3} \cdot 3 \cdot \sqrt{q_u} \cdot f_D \cdot f_A \cdot \left(1 + 0,4 \cdot \frac{L_R}{D}\right)$$

$$q_p = \frac{2}{3} \cdot 3 \cdot \sqrt{0,01 \cdot 450} \cdot 1 \cdot 0,7 \cdot 2,5 \cdot 100 = 742,5 \text{ T/m}^2$$

$$Q_p = 742,5 \cdot 0,2 = 148,5 \text{ T}$$

**Fuste**

$$\tau_f = \frac{3}{10} \cdot \sqrt{q_u} \cdot f_D \cdot f_A < 2 \text{ MPa}$$

$$\tau_f = \frac{3}{10} \cdot \sqrt{450 \cdot 0,01} \cdot 1 \cdot 0,7 \cdot 100 = 44,5 \text{ T/m}^2$$

$$Q_f = 44,5 \cdot 1,57 \cdot 5 = 349,3 \text{ T}$$

**Resistencia total:**Punta: **148,5** TFuste(corto plazo): **16,1+62,8+349,3=428,2** TFuste(largo plazo): **16,1+98+349,3=463,4** T

Los resultados ofrecidos por el programa son suficientemente aproximados, con un error que puede atribuirse al redondeo de los cálculos manuales.

**Corto plazo**Q<sub>p,cp</sub> = 145,78 TQ<sub>f,cp</sub> = 428,91 TQ<sub>tot,cp</sub> = 574,69 T

F.S. = 14,3

**Largo plazo**Q<sub>p,lp</sub> = 145,78 TQ<sub>f,lp</sub> = 464,08 TQ<sub>tot,lp</sub> = 609,86 T

F.S. = 16,7

## 5. CONCLUSIONES

La búsqueda de la solución óptima de un problema exige un estudio exhaustivo de todas las limitaciones que puedan y deban considerarse y de la función objetivo, que deberá ser tan precisa como sea posible. Sin embargo, en problemas como el que se ha fijado como objetivo de este trabajo, para el que se han considerado una serie de simplificaciones con el fin de poder abordarlo, dicha tarea requeriría considerar el dimensionamiento conjunto de toda la estructura, incluidos encepados, vigas de cimentación, etc., y la interacción de todo ello con el terreno, teniendo en cuenta además las distintas cargas que puedan actuar y la naturaleza de las mismas.

Aunque actualmente hay ordenadores personales que pueden realizar hasta el rango de billones de operaciones por segundo, los problemas de optimización siguen requiriendo un esfuerzo computacional excesivo, por lo que su simplificación y acotación sigue siendo una parte fundamental del trabajo a realizar para conseguir una aplicación efectiva.

Por otra parte, un programa informático nunca se puede considerar como completo, estrictamente hablando, ya que siempre podrá incluir nuevas funciones. Requiere una continua renovación en forma de actualizaciones periódicas para poder ampliar su rango de aplicación. Es por tanto necesario contar con usuarios regulares que aporten sus opiniones, propuestas y críticas para poder continuar adaptándose a los cambios de normativa y a la constante evolución de las necesidades de los profesionales.

A continuación se plantean sucintamente varias de las vías de mejora que, al no haberse incluido en el presente Trabajo debido a quedar fuera del alcance o a la imposibilidad de desarrollar con los recursos de que se disponía, quedan pendientes para futuras actualizaciones.

- Combinación de acciones

Aunque se ha supuesto que, dado que ya existen en el mercado aplicaciones que proporcionan las acciones pésimas sobre cimentación, las cargas introducidas corresponden a la combinación más desfavorable, sería recomendable introducir un sistema que permitiese la introducción de las cargas asignando su naturaleza a cada una, dado que introduciendo una única combinación algunas otras situaciones que podrían resultar críticas en cierto aspecto podrían no estar teniéndose en cuenta como es debido.

## Conclusiones

Este añadido, aunque aparentemente sencillo, conllevaría un gran aumento de las iteraciones de cálculo, dado que cada uno de los encepados debería comprobarse para todas las combinaciones distintas.

- Consideración de solicitaciones horizontales e inclinación de pilotes

Los efectos de las solicitaciones horizontales sobre pilotes requieren un estudio más avanzado, sobre todo en los casos en que pudiesen provocar la rotura del terreno de cimentación. Sin embargo, en caso de introducirse, debería barajarse también la opción de calcular pilotes inclinados dentro del encepado, ya que esta es la solución usual a adoptar en dichos casos, tal y como especifica el epígrafe 4.2.8.

Al introducir nuevos estados límite las iteraciones aumentarían el número de operaciones realizadas en cada una de ellas, por lo que se debería reestudiar el volumen total para comprobar si los algoritmos de optimización son válidos.

- Dimensionamiento de elementos de hormigón

El dimensionamiento de las armaduras y la comprobación de validez de los encepados es fundamental para una estimación rigurosa del coste y que se aproxime al máximo a la realidad, además de para estimar las cargas reales que actúen sobre los pilotes.

Esta función de cálculo ya la incluyen otros programas comerciales, pero sin considerarlo a la vez que se calcule la cimentación puede haber situaciones específicas cuyos cálculos no se realicen como deberían.

- Revisión y optimización del código

A pesar de que el código redactado a fecha de publicación del presente Trabajo funciona correctamente, según se ha comprobado en el periodo de prueba, para implementar mejoras será necesaria una revisión exhaustiva, para así reducir cuanto sea posible el esfuerzo computacional que requieren los cálculos iterativos.

Esto se lograría reduciendo el número de operaciones, objetivo que podría lograrse transformando las funciones que se empleen recurrentemente en tablas que se calculen una vez y posteriormente simplemente se consulten e imponiendo un orden estricto a todos los elementos en función de los parámetros representativos para los cálculos, de forma que puedan establecerse condiciones de parada al superar los lími-

tes planteados y que no sea necesario realizar el ciclo completo de operaciones todas las veces que se desee encontrar la mejor solución.

Este proceso podría denominarse, aunque la expresión suene redundante, como la optimización de la optimización, es decir, no solo interesa obtener la solución óptima, sino que además interesa obtenerla con unos consumos de tiempo y energía mínimos.

- Investigación y ajuste de la función de coste

La función de coste de cimentaciones profundas depende de factores geométricos más complejos de detallar que los que se han considerado en el presente trabajo, y para poder aproximar al máximo el precio y, por tanto, la solución óptima, se debería realizar un análisis más detallado tanto de los procesos de ejecución y sus costes como de la probabilidad de que se produzcan excesos de medición por las características del terreno circundante. Este último factor podría expresarse por medio de factores regionales según la zona en que se sitúe el proyecto, en caso de poder generalizarse a tal escala. Para ello deberían estudiarse la mayor cantidad posible de proyectos ya ejecutados de cimentaciones profundas en diferentes zonas y crear una base de datos con los resultados.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Cabrera, T. (s/f). Cimentaciones Profundas: Pilotaje in situ.

Calavera Ruiz, J. (2005). *Cálculo de Estructuras de Cimentación*. Intemac.

Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo. (2007). Código Técnico de la Edificación: Documento Básico: Seguridad Estructural - Cimientos.

Dirección General de Carreteras. (2009). Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera.

Hernandez del Pozo, J. carlos, Ocete Ruiz, I., Lama Fernández, F., & Hernandez Garvayo, J. C. (s/f). Micropilotes Inyectados (Segunda Edición). Recuperado 18 de junio de 2016, a partir de [http://www.geotecnicadelsur.com/wp-content/uploads/2012/11/Micropilotes-inyectados\\_-Segunda-Edici%C3%B3n.pdf](http://www.geotecnicadelsur.com/wp-content/uploads/2012/11/Micropilotes-inyectados_-Segunda-Edici%C3%B3n.pdf)

Jiménez Salas, J. ., Cañizo, L., Escario, B., Molina, R., & Otros. (1976). *Geotecnia Y Cimientos* (Vol. II). Madrid: Editorial Rueda.

Ministerio de Fomento-Puertos del Estado. (2005). Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias.

Peralta Alonso, J. L. (s/f). Apuntes de la asignatura Obras de Edificación.

Pérez Carballo, P. (s. f.). Implementación informática para el cálculo de pilotes de hormigón «in situ» según el código técnico de la edificación. Recuperado 19 de junio de 2016, a partir de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4788>

Rodríguez Ortiz, J. M., Serra Gesta, J., & Oteo Mazo, C. (1989). *Curso aplicado de cimentaciones* (4ª ed.). Servicio de publicaciones del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.

## **Relación de documentos**

(X) Memoria .....	85	páginas
(X) Anexo I.....	80	páginas
(X) Anexo II.....	27	páginas

La Almunia, a 28 de junio de 2016

Firmado: David Ostáriz Falo