



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE SUELOS ARMADOS CON TÉCNICA DE PILOTAJE. APLICACIÓN EN TERRENOS DE RELLENO EN GRAN CANARIA

Autor: Eduardo Rodríguez Galván

Tutores: Orlando Francisco Maeso Fortuny

Guillermo Manuel Álamo Meneses

Curso académico: 2019-2020

HOJA DE FIRMAS

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE SUELOS ARMADOS CON TÉCNICA DE PILOTAJE. APLICACIÓN EN TERRENOS DE RELLENO EN GRAN CANARIA

Autor: Eduardo Rodríguez Galván

Tutores: Orlando Francisco Maeso Fortuny

Guillermo Manuel Álamo Meneses

Curso académico: 2019-2020

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles

Autor	Tutor 1	Tutor 2
Eduardo Rodríguez Galván	Orlando Francisco Maeso Fortuny	Guillermo Manuel Álamo Meneses

RESUMEN TFT

Título	Análisis estructural de suelos armados con técnica de pilotaje. Aplicación en terrenos de relleno en Gran Canaria.
Autor	Eduardo Rodríguez Galván
Tutor/es	Orlando Francisco Maeso Fortuny / Guillermo Manuel Álamo Meneses
Titulación	Grado en Ingeniería Mecánica
Nº Expediente (GTFT)	4042-2019-0022

Antecedentes

En los últimos años, ha resultado necesario construir sobre terrenos problemáticos, un ejemplo de ello son los denominados terrenos de relleno o depósitos antrópicos, suelos que son muy blandos y heterogéneos en los que se desaconseja cimentar sobre ellos. No obstante, debido al incremento de la ocupación del suelo, así como de sus costes de adquisición, ha resultado inevitable construir sobre estos, esta circunstancia se puede observar en Gran Canaria, donde toda la zona del Puerto de la Luz y del aeropuerto de la isla, se ha ejecutado sobre depósitos antrópicos. Ante esta situación, para poder llevar a cabo cualquier tipo de edificación encima de estos suelos, se hace necesario recurrir a tipos de cimentación específicas, que suponen unos costes muy elevados y una gran dificultad de ejecución. Ante este problema, nacieron las técnicas de mejora y refuerzo del terreno, estas técnicas hacen referencia a un amplio panorama de intervenciones ingenieriles que tienen como objetivo dotar de suficiente resistencia y rigidez al terreno, transformando el suelo blando en un terreno apto para construir sobre él. Sin embargo, esta alternativa necesita demostrar su efectividad técnica y económica, con el fin de justificar que el nuevo terreno posee unas características portantes mínimas que le harán susceptible para apoyar sobre él cualquier tipo de edificación, vial o cimentación.

Los pilotes son columnas esbeltas que, aisladamente o en forma de grupos, transmiten los esfuerzos a estratos más profundos y resistentes. Entre sus aplicaciones más típicas se encuentran las de ejercer como cimentación, recalce de estructuras que han sufrido daños o la de ejercer como base soporte de cimientos. También, los pilotes y micropilotes se han venido utilizando como mecanismo de refuerzo de suelos blandos, con el objetivo de que el nuevo terreno pilotado (conocido como "suelo armado") presente unas características resistentes superiores a las del terreno original. A diferencia de otras técnicas de mejora del terreno, este tipo de elementos estructurales, presentan una buena capacidad resistente a compresión, tracción, flexión y corte, además de aportar al suelo flexibilidad y ductilidad. A todas estas ventajas mecánicas, hay que sumarle la gran versatilidad que presentan en su ejecución, que hace que se puedan ejecutar en una amplia variedad de terrenos y en entornos de acceso restringido.

Objetivos

El objeto de este Trabajo Fin de Título es el análisis estructural de suelos armados con técnica de pilotaje. Se evaluará la ganancia de rigidez y la mejora resistente del suelo al pilotarlo. La solución adoptada se determinará tras realizar un estudio paramétrico que permita entender la influencia de los aspectos más relevantes del problema en la mejora resistente del terreno. Se estudiará la influencia que tienen aspectos tales como la separación entre pilotes (S), diámetros (D), longitudes (L) de los mismos y el perfil geotécnico del suelo en la ganancia de rigidez del terreno.

Como estudio de aplicación, se escogerá un terreno de relleno de la isla de Gran Canaria, se reforzará el mismo mediante pilotaje y se adoptarán las soluciones óptimas para distintos niveles de rigidización, atendiendo a aspectos económicos.

La ganancia de rigidez del suelo se calculó mediante un ratio que relaciona el desplazamiento del suelo sin pilotes con el desplazamiento del suelo con pilotes, para una misma fuerza aplicada al terreno con y sin pilotes. Analizar este cociente de desplazamientos es análogo a analizar el cociente de rigidices del suelo pilotado con respecto al suelo sin pilotar (Ec. 1). Todos los desplazamientos se calcularon haciendo uso de un modelo numérico para el análisis de suelos pilotados.

$$\text{Ratio de desplazamientos: } \frac{u_0}{u_p} \rightarrow \frac{K_p}{K_0} = \frac{\frac{F}{u_p}}{\frac{F}{u_0}} = \frac{u_0}{u_p} \quad (\text{Ec. 1})$$

El coste económico de las configuraciones que se estudiaron se realizó también definiendo un ratio (Ec. 2), que relaciona el coste por pilote con la superficie dada por el cuadrado azul mostrado en la Ilustración 1.

$$\text{Ratio de coste por pilote: } \frac{\text{Coste por pilote}}{A} = \frac{\text{Coste por pilote}}{S^2} \left(\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right) \quad (\text{Ec. 2})$$

Proyecto final

Solución adoptada

La parcela escogida se trata de un depósito antrópico situado en la Avenida Finnair en el municipio de San Bartolomé de Tirajana. La técnica de pilotaje seleccionada para armar dicha parcela será la de extracción con barrena continua hueca (CPI-08, según las NTE), una técnica idónea para ser ejecutada en terrenos blandos e inestables, además de ser un método de ejecución muy económico.

Para realizar ambos estudios, se adoptó una malla simétrica y regular de pilotes, consistente en una configuración 6x6 (Ilustración 1). Los pilotes fueron considerados como pilotes flotantes de hormigón en masa con designación HM-35/F/12/I. El suelo se sometió a una carga superficial con dimensiones 0,3 x 0,3 m² en su centro (cuadrado ligeramente sombreado de la Ilustración 1). Los desplazamientos, y por tanto, el ratio de desplazamientos, serán calculados en un mismo punto P(0,0,1) del suelo.

Resultados-conclusiones del estudio paramétrico

Mediante representaciones gráficas (en la Ilustración 2 se muestra una de ellas), se realizó un análisis de la influencia de los distintos parámetros objeto de estudio en la ganancia resistente del terreno, también, con la realización de una nube de puntos donde se representa la ganancia de rigidez del terreno frente al coste económico, se estudió la viabilidad económica para cada configuración estudiada. Entre las conclusiones más significativas que se obtuvieron se encuentran:

- El ratio u_0/u_p sigue una variación prácticamente lineal con respecto al diámetro de los pilotes para cada separación y longitud. Además, el diámetro tiene una mayor influencia sobre la rigidización del suelo a medida que aumenta la longitud del pilote.
- A diferencia del diámetro, la longitud tiene un comportamiento asintótico convexo sobre el ratio de desplazamientos.
- La influencia de la separación sobre el ratio de desplazamientos toma una forma asintótica cóncava (Ilustración 2). El cambio en la separación entre pilotes, provoca las mayores variaciones en las rigidizaciones obtenidas. El efecto rigidizador de la separación, está muy relacionado con el de la longitud, ya que, por muy juntos que se dispongan los pilotes, poco se rigidiza si estos no tienen una esbeltez considerable.
- De la nube de puntos, se puede concluir que, lo ideal económica y estructuralmente hablando es disponer de pilotes/micropilotes esbeltos con diámetros relativamente pequeños (micropilotes) y ya después dependiendo de cuánto sea necesario rigidizar el suelo, disponerlos más o menos cerca entre sí.

Resultados-conclusiones del estudio de aplicación

Para el estudio práctico, se pasó a buscar los casos o configuraciones con valores de rigidez mayores o iguales a 1,75; 1,5 y 1,25 con los menores costes posibles, mediante la representación de una nueva nube de puntos pero ahora para este estudio de aplicación (Ilustración 3). Las soluciones obtenidas para este estudio se muestran en la Tabla 1.

D (m)	L (m)	S (m)	u_0/u_p	Coste por pilote/A
0,3	10	1	1,777	118,27
0,2	8	1	1,555	66,50
0,2	4	1	1,294	52,21

Tabla 1. Soluciones para el estudio aplicación

Para cada una de estas soluciones, se pasó a estudiar los ratios de desplazamientos obtenidos a lo largo de la profundidad del suelo en su plano central, mediante mapas de colores (Ilustración 4). Entre las conclusiones más destacadas que se obtuvieron para estas representaciones se encuentran:

- Los resultados obtenidos en el punto P(0,0,1) no son más que unos resultados orientativos y menores que los que realmente se obtienen en las zonas cercanas a la superficie de carga.
- Por último, destacar que, en realidad, el terreno se encontraría cargado en varias partes del mismo y no solo en el centro de este, lo que hará que las rigidizaciones que se obtengan a lo largo del suelo sean superiores a las que se han obtenido en este estudio.

Imágenes:

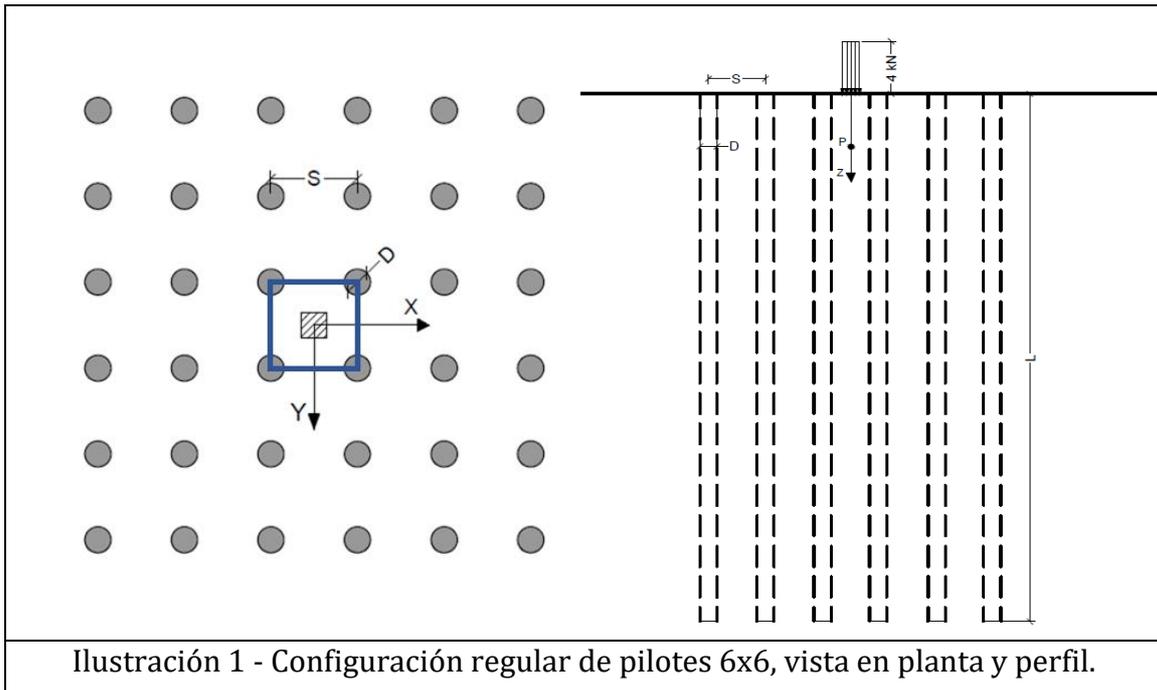


Ilustración 1 - Configuración regular de pilotes 6x6, vista en planta y perfil.

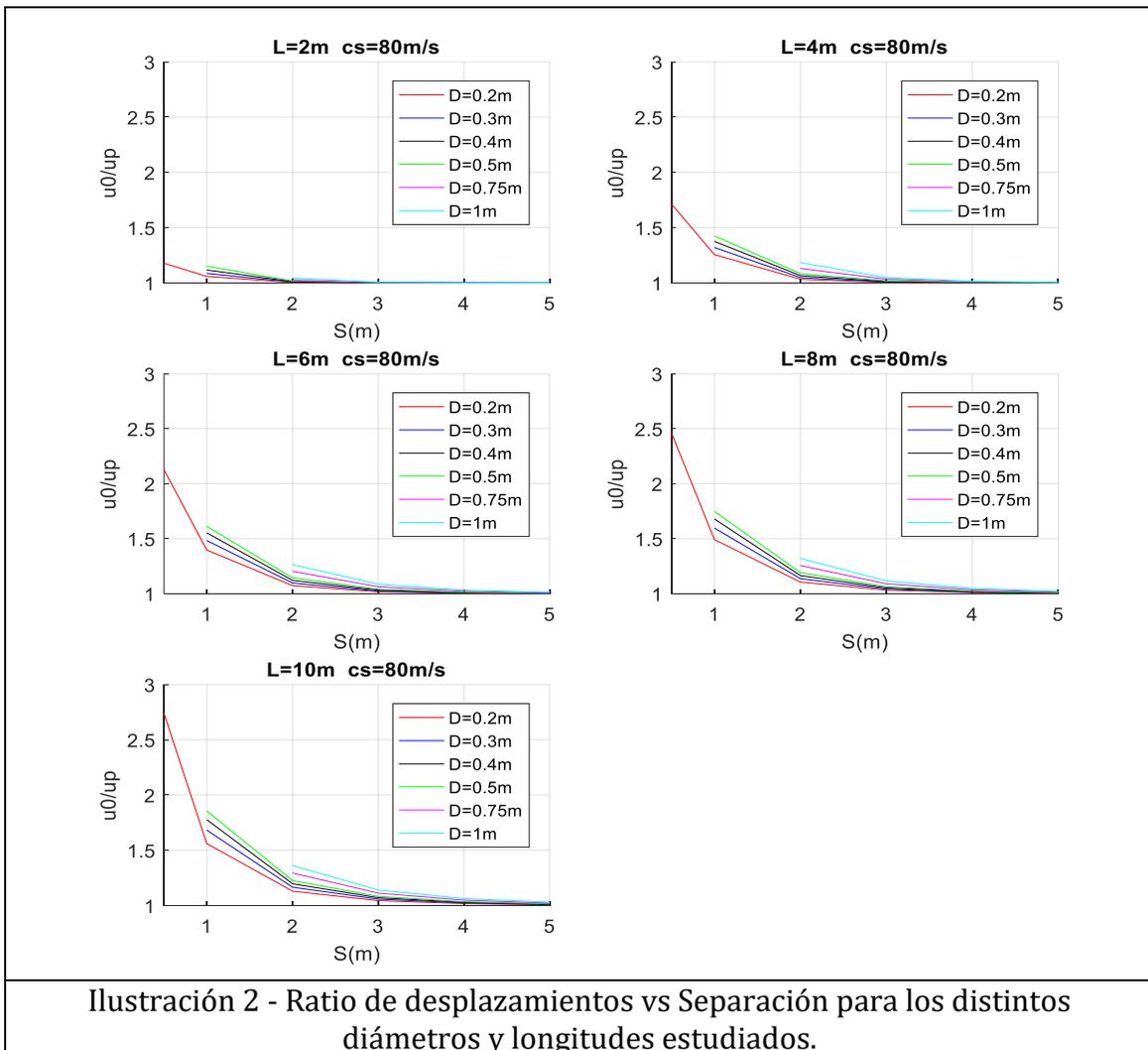
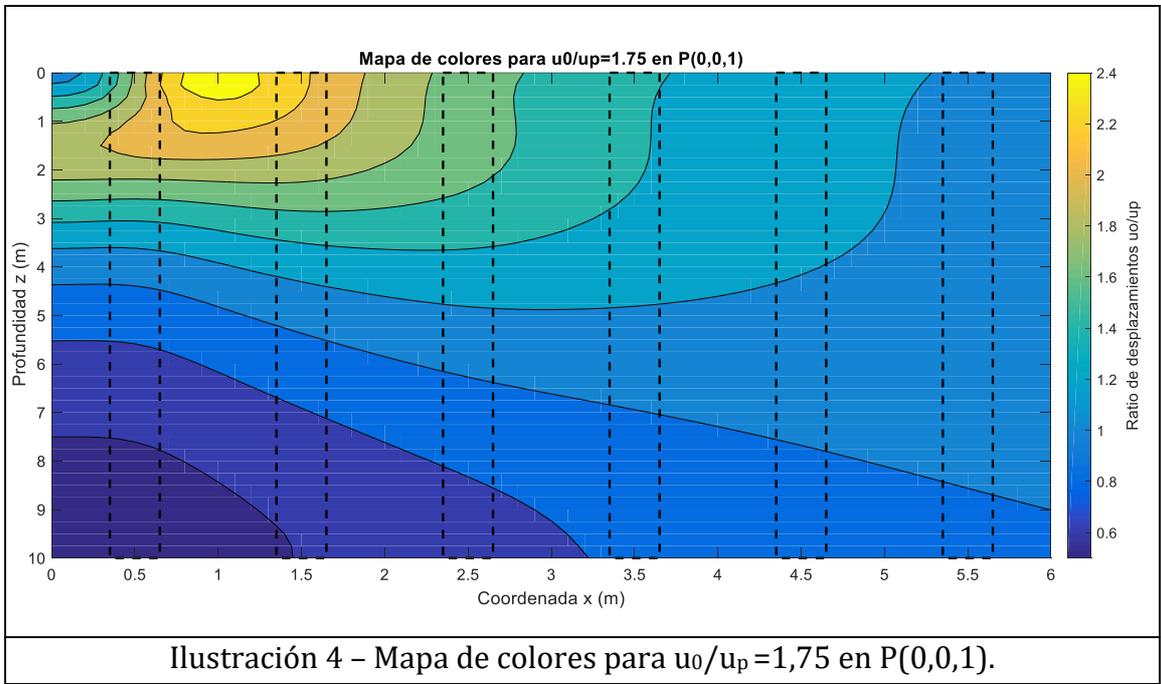
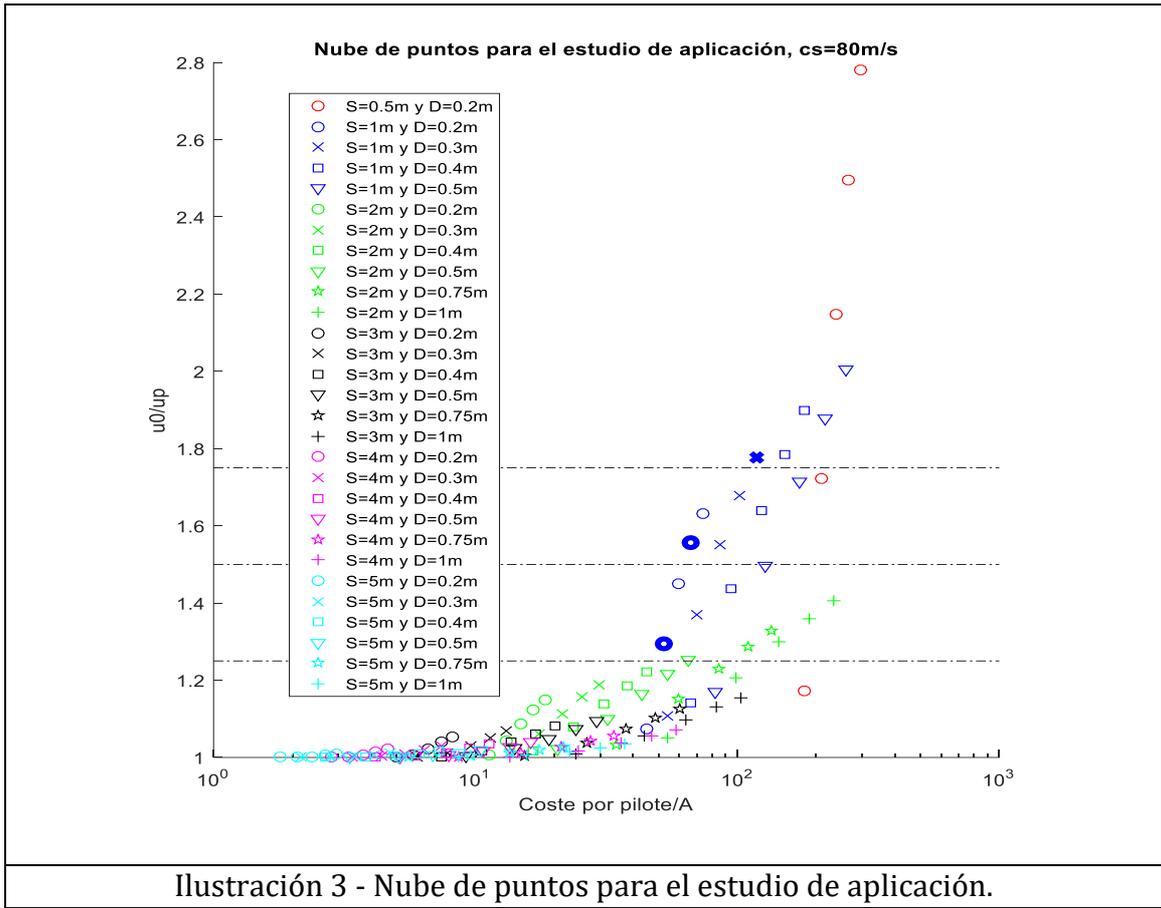


Ilustración 2 - Ratio de desplazamientos vs Separación para los distintos diámetros y longitudes estudiados.



FINAL PROJECT SUMMARY

Title	Structural analysis of reinforced soils with pile technique. Application in fill grounds in Gran Canaria.
Author	Eduardo Rodríguez Galván
Supervisors	Orlando Francisco Maeso Fortuny/ Guillermo Manuel Álamo Meneses
University degree	Mechanical Engineering Degree
File No. (GTFT)	4042-2019-0022

Backgrounds

For the latest several years, due to the increase of the land-use and its acquisition costs it has been necessary to build on weak soils. An example of this situation is the so-called infill grounds or anthropogenic (human-induced) reservoirs, these are very soft and heterogeneous soils, in which it is not recommended to lay foundations or to build on them. Nevertheless, it is increasingly inevitable to build on these types of soils, this circumstance can be seen in Gran Canaria, where the entire area of the island's port and airport has been built on infill grounds. Under this circumstance, in order to carry out any type of building on top of these soils, it is necessary to resort to specific types of foundations, which entail very high costs and difficulties in its execution. In order to face this problem, techniques for improving and reinforcing the ground emerged. These techniques cover a wide variety of engineering solutions, which transform the soft soil into a suitable ground to build on it. However, this alternative needs to demonstrate its technical and economic effectiveness, in order to justify that the new terrain has minimal supporting characteristics that will make it susceptible to support any type of building, road or foundation.

The piles are slender columns that, in isolation or in the form of groups, transmit the stresses to deeper and more resistant strata. Their typical applications are exercising as a foundation, underpinning structures that have suffered damage, or being used as a foundation support base. Besides, piles and micropiles have been used as a soil reinforcement mechanism, with the aim that the new piled ground (also known as "reinforced soil") presents better strength properties than the original terrain. In contrast with other soil improvement and reinforcing techniques, these types of structural elements have a good tough capacity against compression, traction, flexion and shear, as well as they provide flexibility and ductility to the ground. In addition to these mechanical advantages, it is also important to emphasize the great versatility that they present in their execution, which means that they can be executed in a wide variety of terrains and in restricted access environments.

Objectives

The aim of this End-of-Degree Project is the structural analysis of reinforced soils with pile technique. The stiffness gain and the strength improvement of the ground will be evaluated after driving it. The solution adopted will be determined after carrying out a parametric study that allows analysing and understanding the influence of the most relevant aspects of the problem on the stiffness gain of the terrain. The influence of aspects such as the separation between piles (S), diameters (D), lengths (L) and the geotechnical profile of the soil on the stiffness gain of the ground will be studied.

As an application, an infill ground of Gran Canaria will be chosen, the piling technique will be applied on it and the optimal solutions for different levels of stiffness will be studied and evaluated, taking also into account economic aspects (cost of each solution).

The soil stiffness gain was calculated using a ratio that relates the displacement of the soil without piles with the displacement of the soil with piles, for the same force applied to the terrain with and without piles. Analyzing this displacement ratio is analogous to analysing the stiffness ratio between the soil with piles and without piles (Eq. 1). All displacements were calculated using a numerical model for the analysis of piled soils.

$$\text{Displacement ratio: } \frac{u_0}{u_p} \rightarrow \frac{K_p}{K_0} = \frac{\frac{F}{u_p}}{\frac{F}{u_0}} = \frac{u_0}{u_p} \quad (\text{Eq. 1})$$

The economic cost of the configurations that were studied was also carried out by defining a ratio (Eq. 2), which relates the cost per pile with the area given by the blue square shown in Figure 1.

$$\text{Cost per pile ratio: } \frac{\text{Cost per pile}}{A} = \frac{\text{Cost per pile}}{S^2} \left(\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right) \quad (\text{Eq. 2})$$

Final Project

Adopted solution

The chosen location is an anthropogenic reservoir located on Avenida Finnair, in San Bartolomé de Tirajana (south of the island of Gran Canaria). The piling technique selected to implement in this area will be the technique of extraction with continuous hollow auger (CPI-08, according to NTE), because it is ideal technique to be carried out on unstable loose terrains, in addition to be a very economical method of execution.

To carry out both studies, a regular and symmetrical pile mesh was adopted, consisting of a 6x6 configuration (Figure 1). The piles were considered as floating piles made of mass concrete with a designation HM-35/F/12/I. The soil was subjected to a surface load with dimensions 0,3 x 0,3 m² at its centre (lightly shaded square of Figure 1). The displacement, and therefore the displacement ratio, will be calculated at the point P(0,0,1) of the ground.

Results and conclusions of the parametric study

By means of graphic representations (one of them is shown in Figure 2), an analysis of the influence of the different parameters on the stiffness gain of the soil was carried out, as well as, with the realization of a point cloud, where the stiffness gain of the ground versus the economic cost is represented, the economic viability for each configuration was also studied. Among the most significant conclusions that were obtained are:

- The u_0/up ratio follows a practically linear variation with respect to the diameter of the piles for each separation and length. Furthermore, the diameter has a bigger influence on the stiffening gain of the soil as the length of the pile increases.
- The length of the piles has a convex asymptotic behaviour on the displacement ratio, unlike the diameter.
- The influence of the separation on the displacement ratio takes a concave asymptotic shape (Figure 2). The change in the separation between piles causes the greatest variations in the stiffening obtained. The stiffening effect of the separation is closely related with the length, since small stiffening are obtained if the slenderness of the piles is not considerable, regardless of how much of the piles are arranged together.
- From the point cloud, it can be concluded that, economically and structurally speaking, the ideal is to have slender piles/micropiles with relatively small diameters and, depending on how much it is necessary to stiffen the ground, to arrange them more or less close to each other.

Results and conclusions of the application study

For the practical study, the cases or configurations with stiffness values greater than or equal to 1,75; 1,5; 1,25 and with the lowest costs were selected, by representing a new point cloud but now for this application study (Figure 3). The solutions obtained for the different stiffening levels are shown in Table 1.

D (m)	L (m)	S (m)	u_0/up	Cost per pile/A
0,3	10	1	1,777	118,27
0,2	8	1	1,555	66,50
0,2	4	1	1,294	52,21

Table 1. Application study results.

For each of these solutions, the displacement ratios obtained throughout the depth of the soil in its central plane were studied using colour maps (Figure 4). Among the most outstanding conclusions for these representations are:

- The results obtained at point P(0,0,1) are only indicative results and smaller than those actually obtained in the areas near the loading surface.
- Lastly, it should be noted that, in reality, the terrain would be loaded in several parts of it and not only in its centre, this means that the stiffening that will be obtained throughout it will be greater than those obtained in this study.

Figures:

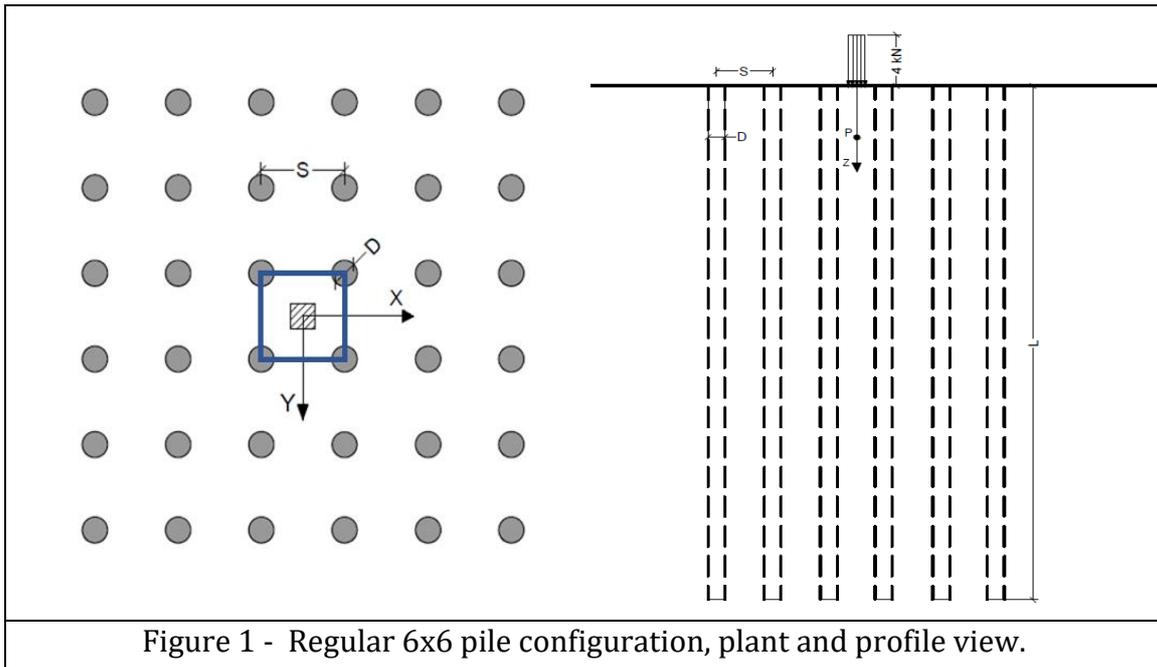


Figure 1 - Regular 6x6 pile configuration, plant and profile view.

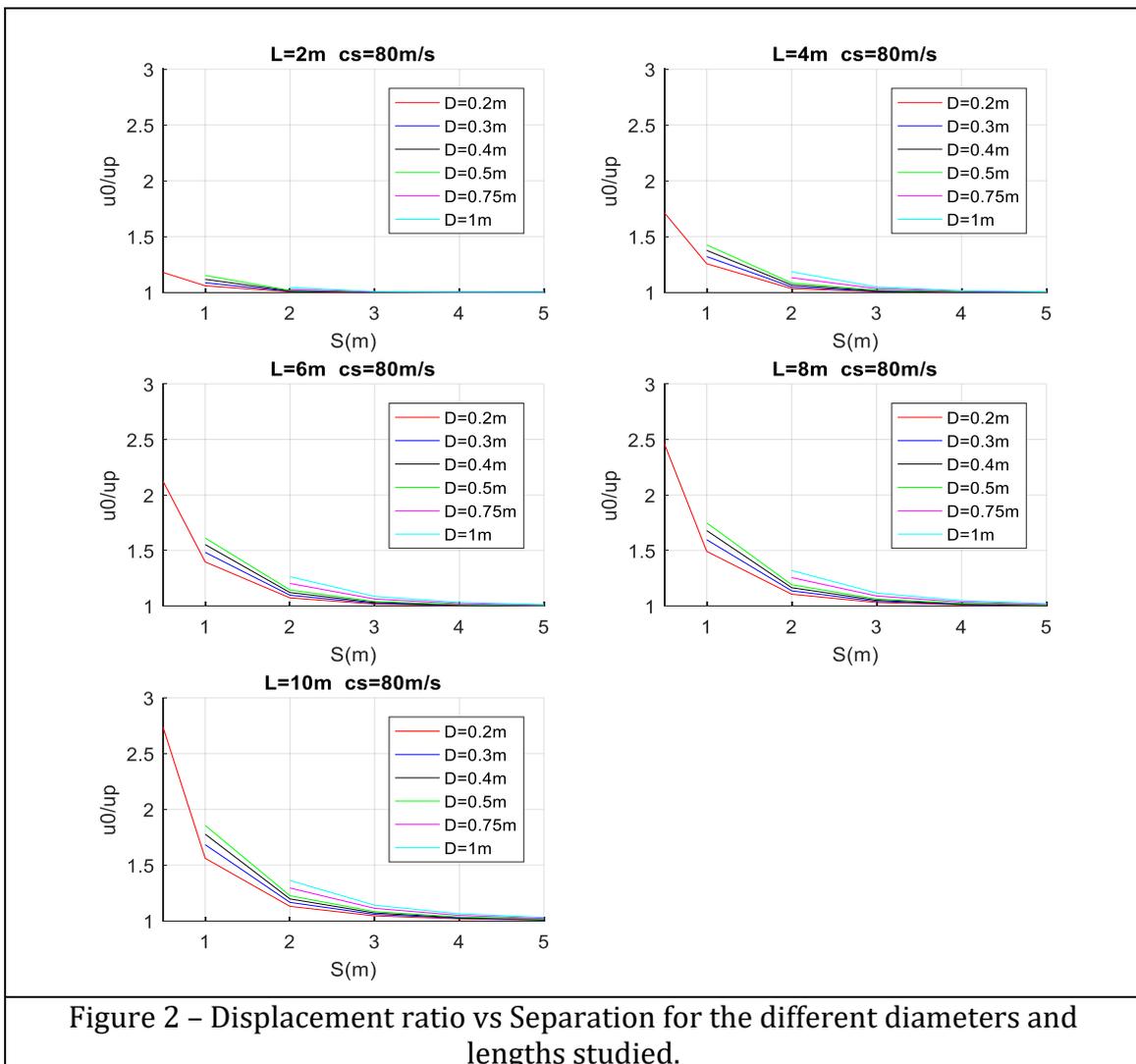


Figure 2 - Displacement ratio vs Separation for the different diameters and lengths studied.

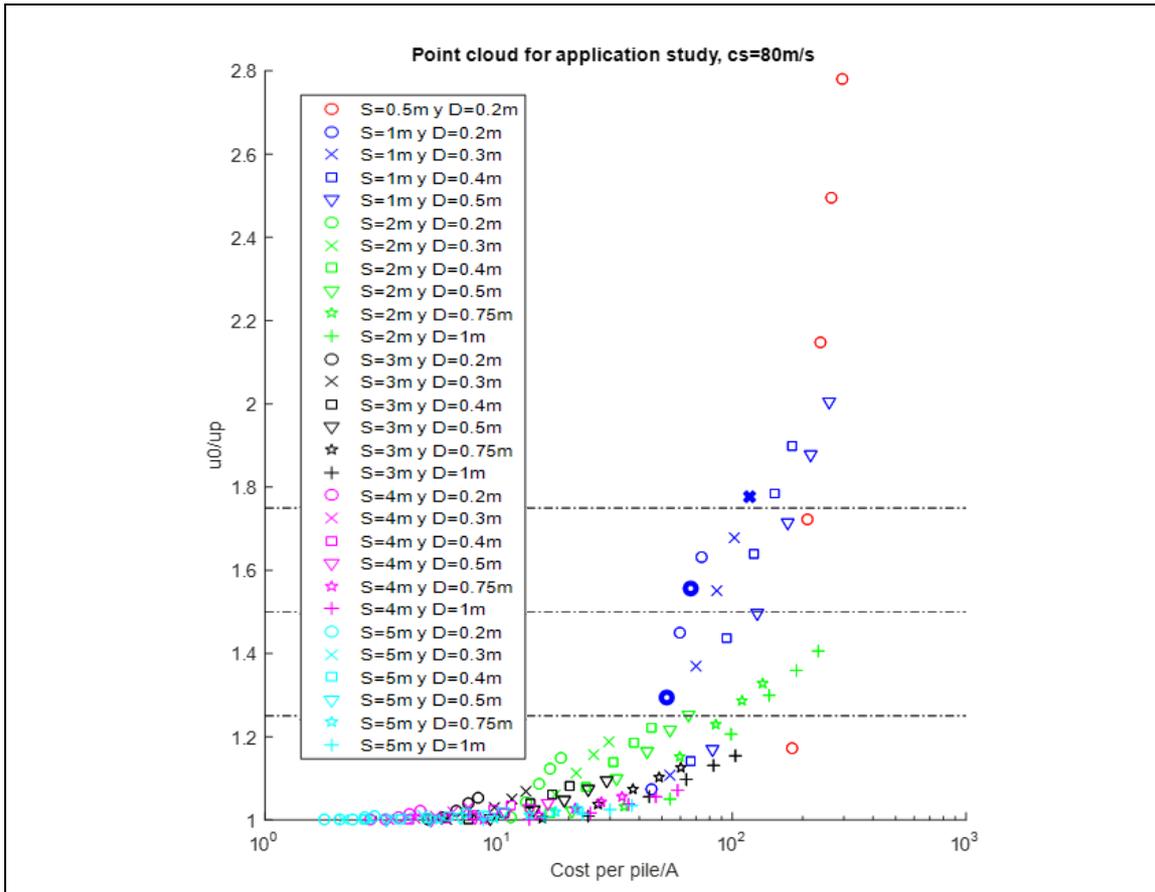


Figure 3 – Point cloud for the application study.

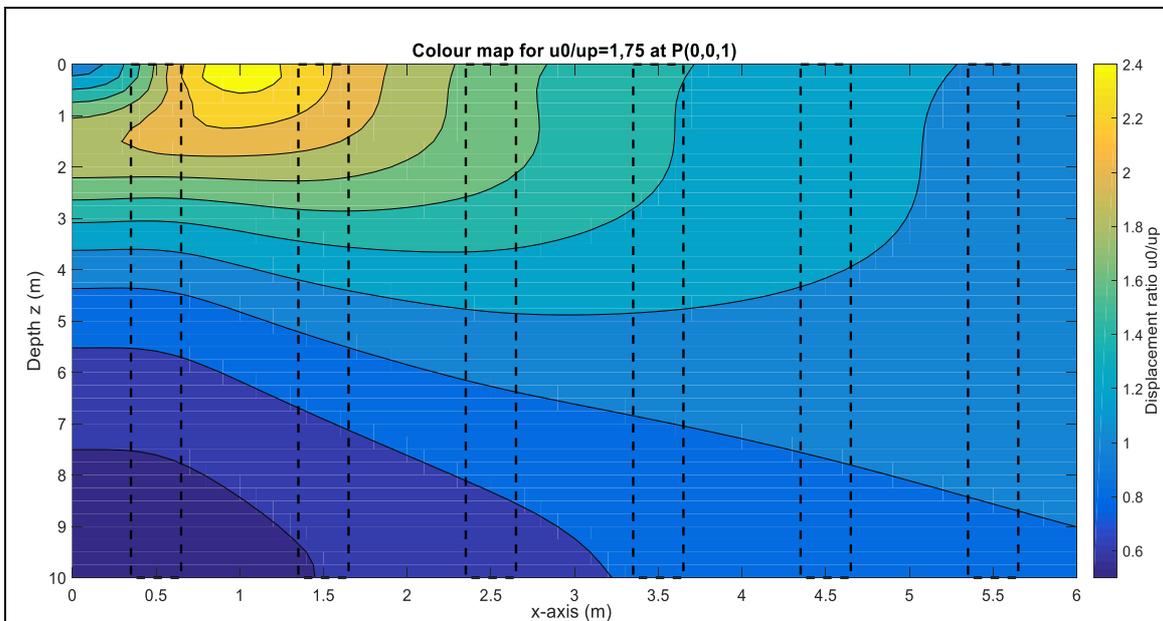


Figure 4 – Colour map for $u_0/u_p=1,75$ at P(0,0,1).

ÍNDICE GENERAL

MEMORIA DESCRIPTIVA

ESTUDIO PARAMÉTRICO Y DE APLICACIÓN

PRESUPUESTOS DE LOS PILOTES ESTUDIADOS

ANEXO I: JUSTIFICACIÓN DE LA ELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DEL TERRENO.

ANEXO II: RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS

PLANOS DE LAS CONFIGURACIONES ESTUDIADAS

MEMORIA DESCRIPTIVA

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE SUELOS ARMADOS CON TÉCNICA DE PILOTAJE. APLICACIÓN
EN TERRENOS DE RELLENO EN GRAN CANARIA.

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Emplazamiento	3
1.4. Normativas consultadas	4
2. Software utilizado	4
3. Los pilotes como elementos de refuerzo y mejora del terreno	5
3.1. Mejora o refuerzo del terreno	5
3.1.1. Tipologías de técnicas de mejora y refuerzo del terreno	6
3.2. Pilotes	8
3.2.1. Definición y aplicación de los mismos	8
3.2.2. Los pilotes como elementos de refuerzo del terreno	10
3.2.3. Tipologías de pilotes	11
3.2.4. Tipologías de pilotes in situ según el procedimiento de ejecución	13
3.3. Criterios a tener en cuenta para elegir el tipo de pilotaje idóneo para un determinado tipo terreno	24
3.3.1. Resumen de los tipos de pilotajes idóneos para los distintos tipos de terrenos.. 26	
4. Solución adoptada	27
4.1. Parcela elegida	27
4.2. Técnica de pilotaje elegida para armar el suelo	27
5. Referencias	28

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Esquema con los objetivos del presente trabajo.	3
Ilustración 2. Ubicación	3
Ilustración 3. Clasificación de los distintos sistemas de mejora y refuerzo del terreno	8
Ilustración 4. Refuerzo con pilotes de mortero sobre la traza de una tuneladora [1].	11
Ilustración 5. Clasificación de los pilotes por su forma de trabajo [4].	12
Ilustración 6. Hincas de la entubación de pilote de desplazamiento con azuche [6].	14
Ilustración 7. Procedimiento constructivo de un pilote con tapón de gravas [6].	15
Ilustración 8. Ejecución de pilotes roscados sin extracción de terreno [9].	16
Ilustración 9. Proceso constructivo para un pilote de extracción con tubería recuperable [6].	17
Ilustración 10. Fases de ejecución del pilote de extracción con camisa perdida [9].	18
Ilustración 11. Método de perforación con circulación directa. UNE EN 1536 [9].	19
Ilustración 12. Método de perforación con circulación inversa. UNE EN 1536 [9].	19
Ilustración 13. Fases constructivas para el pilote perforado sin entubación con fluidos estabilizadores [6].	20
Ilustración 14. Pilote barrenado sin entubación [6].	21
Ilustración 15. Fases de ejecución del pilote de extracción con barrena continua hueca [9].	22
Ilustración 16. Esquema con la clasificación general de los pilotes.	23
Ilustración 17. Clasificación de los pilotes atendiendo al procedimiento constructivo.	24

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores orientativos del coeficiente de Permeabilidad (Según el CTE [4], DBSE-C, en tu tabla D.28).....	25
Tabla 2. Tabla-resumen de los tipos de pilotajes idóneos para los distintos tipos de terreno.	26

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Las principales diferencias entre el terreno y los demás componentes del sistema estructural son sin duda, la heterogeneidad y la discontinuidad que presenta el suelo, características que le confieren mayor complejidad en su comprensión. Estas variaciones presentes en el terreno pueden dar lugar a que los estratos inmediatos a la superficie presenten escasa capacidad portante, que los estratos más resistentes se encuentren a cierta profundidad, o incluso, se puede dar el caso de que la composición completa del suelo presente bajas características portantes y sea necesario un proceso de mejora y acondicionamiento del mismo. Es en estos aspectos, donde juegan un papel fundamental los pilotes y micropilotes.

Los pilotes son columnas esbeltas que, aisladamente o en forma de grupos, transmiten los esfuerzos a estratos más profundos y resistentes. Este tipo de elementos estructurales, a diferencia de otras técnicas de mejora del terreno, presentan una buena capacidad resistente a compresión, tracción, flexión y corte, además de aportarle al suelo flexibilidad y ductilidad. A todas estas ventajas mecánicas, hay que sumarle la gran versatilidad que presentan en su ejecución, que hace que se puedan ejecutar en una amplia variedad de terrenos y en entornos de acceso restringido. Entre sus aplicaciones más típicas se encuentran las de ejercer como cimentación, recalce de estructuras que han sufrido daños, o la de ejercer como base soporte de cimientos. Sin embargo, los pilotes y micropilotes también se han venido utilizando como mecanismo de refuerzo de suelos blandos, con el objetivo de que el nuevo terreno pilotado (conocido como "suelo armado") presente unas características resistentes superiores a las del terreno original.

Los procedimientos de mejora y refuerzo de terreno para resolver problemas de cimentaciones y apoyo de estructuras térreas viarias tienen un origen muy antiguo. En Asia, mucho antes de Jesucristo, se utilizaban troncos de madera para "armar" el terreno en el trasdós de muros y para mejorar superficialmente el terreno bajo las calzadas [1].

En los últimos años, debido a que cada vez la ocupación del suelo es mayor, así como sus costes de adquisición, se ha hecho necesario construir sobre terrenos problemáticos. De esta forma, es frecuente en la obra civil, encontrar situaciones en las que se generan depósitos de suelo que provienen de operaciones de desmontes o de movimientos de grandes volúmenes de terreno, dando lugar a los denominados terrenos de relleno. Esto ocurre en obras civiles asociadas a algunas infraestructuras viarias y/o algunas infraestructuras portuarias. Debido a la heterogeneidad de este tipo de suelos, las propiedades resistentes de los mismos son muy bajas. Por tanto, si se pretende

construir en ellos, será preciso recurrir a tipologías de cimentación específicas para estos terrenos blandos, tipologías que son indefectiblemente más caras y complicadas desde el punto de vista técnico, que aquellas que podrían ser utilizadas en terrenos compactos.

Ante esta circunstancia, se puede optar por una opción alternativa, que es la de acometer el acondicionamiento previo del terreno de relleno, de forma que se le dote de suficiente resistencia y rigidez, transformando el terreno blando en un terreno apto para construir sobre él, sin necesidad de recurrir a las soluciones típicas de cimentación que son más costosas. Con este objetivo, nacieron las técnicas de mejora y refuerzo del terreno. No obstante, estas alternativas necesitan demostrar su efectividad técnica y eficiencia económica, con el objetivo de asegurar que el nuevo suelo obtiene unas propiedades resistentes mínimas, que le harán susceptible para apoyar sobre él cimentaciones, viales o servicios.

1.2. Objetivos

El objetivo del presente Trabajo Fin de Título es el análisis estructural de suelos armados con técnica de pilotaje. Se evaluará la ganancia de rigidez y la mejora resistente del suelo al pilotarlo. Se estudiará la influencia que tienen aspectos tales como la separación entre pilotes, esbeltez de los mismos y el perfil geotécnico del suelo en la ganancia de su rigidez, mediante la realización de un estudio paramétrico que permita analizar y entender la influencia de estos parámetros en la ganancia resistente del suelo.

Como aplicación, se tomará un terreno de relleno de la isla de Gran Canaria, se le aplicará la técnica de pilotaje y se evaluarán las soluciones óptimas para diferentes niveles de rigidización, atendiendo a aspectos económicos.

Con todo esto, se pretende obtener una mejora en los criterios de diseño y elección de parámetros en la técnica de pilotaje como sistema de refuerzo del terreno. En la Ilustración 1, se muestran de forma esquematizada los objetivos del presente trabajo.

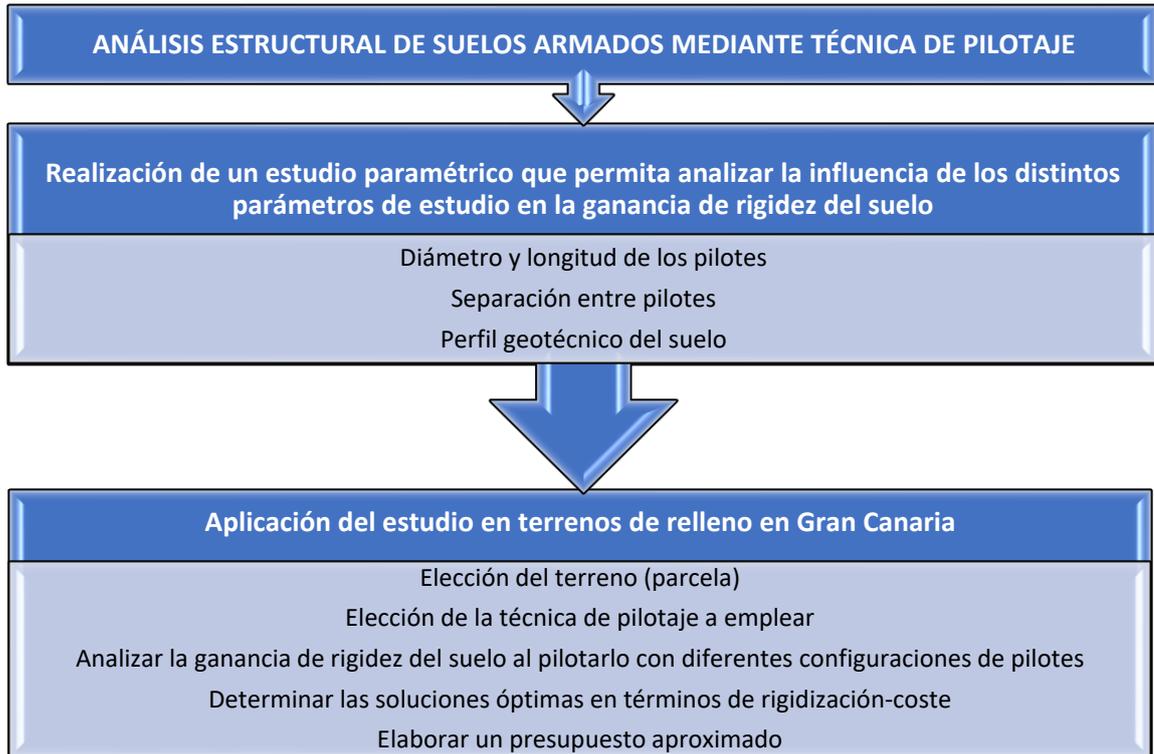


Ilustración 1. Esquema con los objetivos del presente trabajo.

1.3. Emplazamiento

La ubicación escogida para armar el suelo se basó principalmente en encontrar un terreno de relleno en la isla de Gran Canaria (en el Anexo I del presente trabajo se justifica su elección, así como las características de este). La parcela elegida se encuentra en la Avenida Finnair en el municipio de San Bartolomé de Tirajana (Ilustración 2), al sur de la isla de Gran Canaria. Se encuentra al lado del parque de bomberos de Maspalomas y en frente de la ciudad deportiva de Maspalomas.

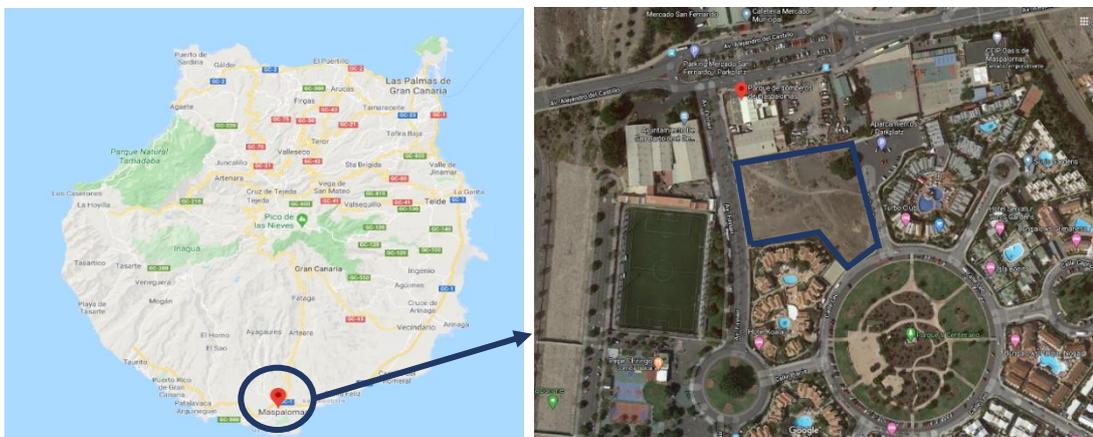


Ilustración 2. Ubicación

1.4. Normativas consultadas

Actualmente, no existe ninguna normativa específica que trate sobre los métodos de mejora y refuerzo de los suelos, ni ningún programa de estudios específico de estos. El CTE, en su Documento Básico de Seguridad estructural Cimientos (DBSE-C), tiene un apartado específico que trata sobre la mejora o refuerzo del terreno (apartado 8 del mismo), sin embargo, no profundiza nada sobre las diferentes técnicas existentes en el refuerzo del terreno.

Por otra parte, en la guía de cimentaciones en obras de carretera (Ministerio de Fomento, 2002), en su apartado 7, trata sobre los distintos tratamientos de mejora del terreno, pero como su nombre indica, se limita solamente a las obras de carretera.

Por último, recalcar de nuevo que el objetivo del presente trabajo es el análisis de suelos armados mediante técnica de pilotaje, y como aplicación a dicho análisis, se estudiará su posibilidad de uso en un terreno de relleno de la isla de Gran Canaria. Por tanto, en dicho análisis y posible aplicación, no se está obligado a cumplir con una normativa en concreto.

2. Software utilizado

Si bien existe un amplio abanico de programas para resolver análisis numéricos estructurales, como lo son ANSYS o Code_Aster entre los más usuales, para el análisis estructural que se realizará en este trabajo, se utilizará un software desarrollado en el seno de la División de Mecánica de Medios Continuos y Estructuras del Instituto Universitario SIANI, de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC).

Este software se basa en la implementación de una solución fundamental de semiespacio estratificado en un modelo acoplado de Elementos de Contorno - Elementos Finitos (EC-EF) preexistente para el análisis de cimentaciones y estructuras pilotadas. El comportamiento del terreno es simulado con la implementación de soluciones fundamentales (Funciones de Green) de semiespacio estratificado, mientras que los pilotes son discretizados con elementos finitos tipo viga. Las variables primarias son los desplazamientos y las fuerzas resultantes que representan la interacción con el suelo. Además, dicho software, permite asumir diferentes fuentes de excitación del sistema suelo-pilotes. Dichas fuentes pueden ser: trenes de ondas sísmicas que imponen un campo incidente en los puntos del terreno estratificado, cargas externas actuando sobre la superficie libre del terreno, o acciones directamente impuestas en los encepados o en las cabezas de los pilotes mediante el establecimiento de fuerzas o desplazamientos prescritos [2].

El uso de este software es relativamente sencillo, basta con proporcionarle un fichero de datos para cada configuración o problema que se quiera resolver. Este fichero de datos o de entrada contiene los datos relativos a las propiedades mecánicas/elásticas del suelo y de los pilotes, condiciones de contorno de los pilotes, distribución geométrica de los pilotes, sus características principales (número de pilotes, separación entre pilotes, coordenadas de cada pilote, diámetros, longitudes...), cargas a las que está sometido el suelo y los puntos del suelo donde se quieren calcular las soluciones. A su vez, el programa devuelve las soluciones en diferentes ficheros de salida.

Para la elaboración de los ficheros de entrada y para el tratamiento y análisis de los ficheros de salida, se usó el programa Matlab. De manera que, generando una serie de códigos en este, se automatizó la elaboración de los ficheros de entrada y el tratamiento de los ficheros de salida que proporcionaba el software usado. Además, el análisis de los resultados se realizó mediante representaciones gráficas y mapas de colores también elaborados en Matlab.

3. Los pilotes como elementos de refuerzo y mejora del terreno

3.1. Mejora o refuerzo del terreno

Normalmente, cuando el conjunto de propiedades hace que se califique al suelo como blando, deformable, alterado, etc, lo más habitual es solucionar dichas carencias del terreno optando por cimentaciones profundas. No obstante, como alternativa se pueden emplear técnicas muy diversas que permiten cambiar las propiedades del terreno, a fin de transformarlo en otro que ya no necesite la solución profunda. Esta última suele ser más rígida y más conservadora, pero, en muchas ocasiones, el coste es claramente superior, por lo que disponer de soluciones más flexibles (algo más deformables) y más cerca de los límites admisibles puede ser muy adecuado y económico, en función del problema a resolver. Con esta intención nacieron las técnicas de mejora y refuerzo del terreno. Estas técnicas hacen referencia a un amplio panorama de intervenciones ingenieriles que supone el ejercer una cierta acción sobre el terreno para acabar modificando sus propiedades y su respuesta frente acciones exteriores e interiores al propio terreno [1].

Es por esto por lo que la mejora del terreno es uno de los temas de más auge actualmente en ingeniería geotécnica, ya que se presenta como alternativa para poder construir en terrenos blandos o compresibles con todas las garantías desde el punto de vista técnico, pero de una manera más eficiente, rápida, fácil y económica, además de presentar ventajas importantes también desde el punto de vista medioambiental [3].

En este sentido, según el CTE en su DBSE-C y en su apartado 8 (Mejora o refuerzo del terreno), se entiende por mejora o refuerzo del terreno como el incremento de las propiedades resistentes o de rigidez para poder apoyar sobre él adecuadamente cimentaciones, viales o servicios [4].

3.1.1. Tipologías de técnicas de mejora y refuerzo del terreno

En este apartado se tratará sobre las distintas técnicas de mejora y refuerzo del terreno, se mostrarán brevemente los sistemas más comunes y su clasificación, para así entender mejor dónde se sitúan los pilotes y micropilotes como técnicas de mejora y refuerzo del terreno.

En la Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera del Ministerio de Fomento [5], se consideran técnicas de mejora y refuerzo del terreno los siguientes métodos [1]:

- Sustitución.
- Compactación con rodillo.
- Precarga.
- Mechas drenantes (o drenes de plástico).
- Vibración profunda (o vibroflotación, sin aportación de material).
- Compactación dinámica (apisonado intensivo o dinámico).
- Inyecciones.
- Jet-grouting.
- Columnas de grava.
- Columnas de suelo-cemento.
- Bulones (chaveteado).
- Geosintéticos (geotextiles, geomallas, etc.)
- Otros: Explosivos, tratamientos térmicos (calentamiento, congelación, electrólisis).

A esta relación cabe añadir [1]:

- Las columnas de suelo-cal (variante de las de suelo-cemento)
- Las columnas de suelo cemento tipo "springsol" con mezcla de terreno más allá del diámetro nominal de perforación.
- Electro-osmosis para consolidación.
- Los micropilotes y pilotes que pueden utilizarse como mejora resistente del terreno (como barreras pasivas entre túneles y edificios, p.e.)
- Inyecciones armadas con tubo metálico (o de P.V.C en algunos casos) con finalidades similares a las indicadas para los micropilotes y pilotes.

- Las columnas de mortero con desplazamiento (o de módulo controlado).
- La mezcla directa de suelo (generalmente, arcilloso) con cal u otro aglomerante similar, para formar núcleos de terraplenes.
- Suelo reforzado con neumáticos.

Todos estos sistemas, pueden clasificarse, por el principio de actuación, en los siguientes grupos [1]:

- **Técnicas de sustitución:** Remoción del material original y su sustitución por otro mejor (mayor cohesión) o más grueso (compactado) o por el mismo mejor compactado. Suele realizarse en los primeros metros del terreno, por encima del nivel freático.
- **Técnicas estáticas:** Precarga a fin de aumentar la resistencia del terreno. Con esta idea se pretende aplicar una carga estática o quasi-estática sobre un terreno, más o menos blando, a fin de producir asientos a lo largo de un periodo en que no está constituida la estructura definitiva, para que esta no sufra dichos movimientos.
- **Técnicas de inclusiones resistentes:** Tienen como objetivo “armar” un terreno blando o flojo para conseguir una estabilidad de conjunto, con una cierta elevación de resistencia al corte y una disminución global de la deformabilidad. Se encuentran en este grupo las inyecciones armadas, las columnas de Jet-grouting, las columnas de mortero, columnas de cal, micropilotes, pilotes de hormigón armado, pilotes de mortero (no armados), etc.
- **Técnicas dinámicas:** en este grupo destacan los sistemas que pretenden reducir el volumen ocupado por un terreno flojo, bien en un espesor superficial de algunos metros, o bien en vertical y profundidad. Se encuentran en este grupo los sistemas de compactación con rodillo, vibroflotación y compactación dinámica.
- **Técnicas de mezclado con aditivos fraguantes en plan masivo:** estos sistemas se basan en añadir aditivos al suelo (como puede ser la cal) a fin de mejorar las características geotécnicas o de trabajabilidad del terreno. Se incluyen en este grupo los terraplenes de arcilla con cal, “Sandwichs” terreno natural-terreno con aditivo.

A continuación (Ilustración 3), se muestra de forma esquemática la clasificación de las técnicas de mejora o refuerzo del terreno con los distintos métodos más típicos que lo forman.

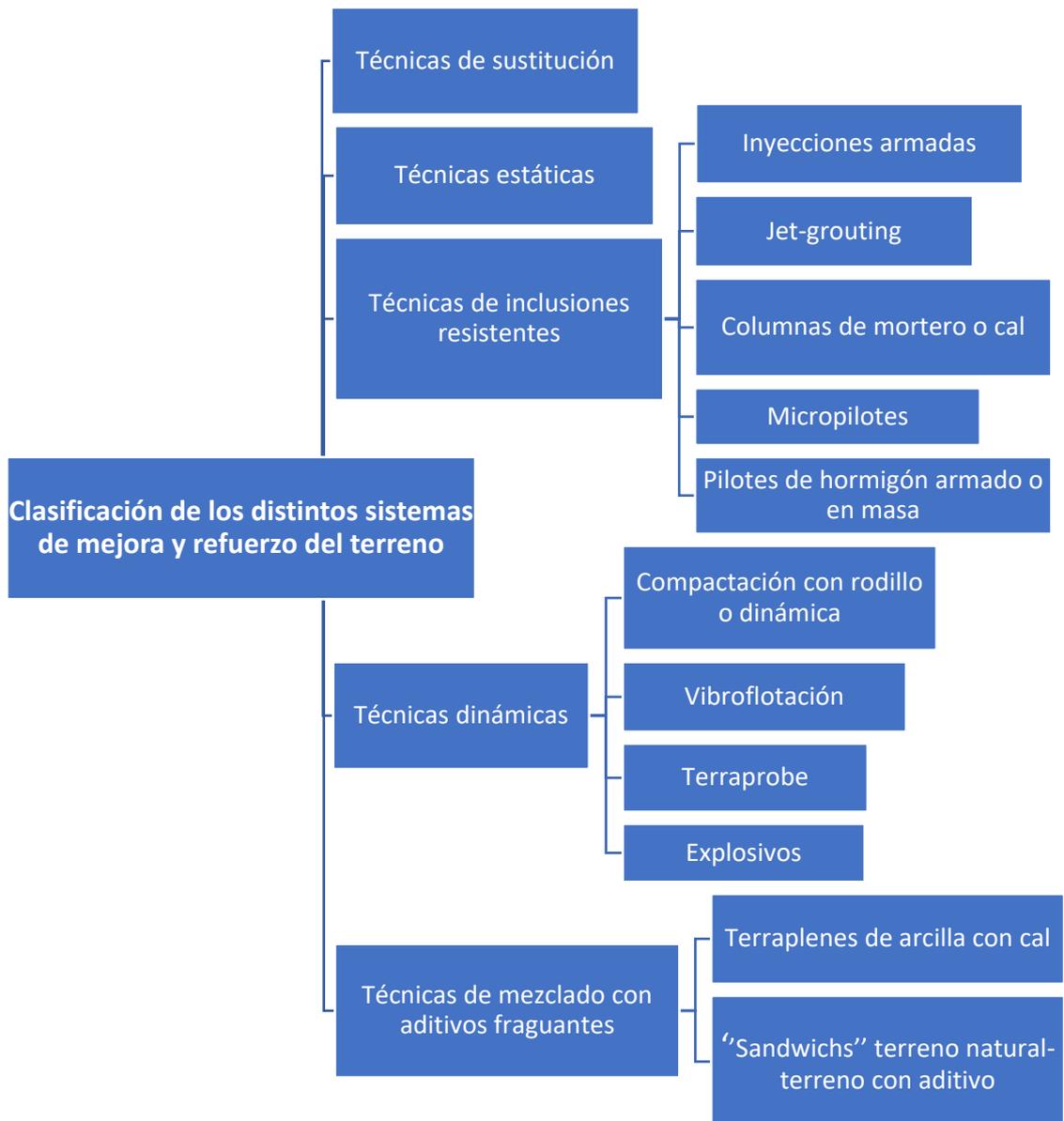


Ilustración 3. Clasificación de los distintos sistemas de mejora y refuerzo del terreno

3.2. Pilotes

3.2.1. Definición y aplicación de los mismos

Antes de proceder a explicar el papel que juegan los pilotes como elementos de mejora y refuerzo del terreno y estudiar sus tipologías, se hace imprescindible definirlos y conocer el concepto de cimentación profunda.

Se denomina pilote a una tipología de cimentación en profundidad empleada habitualmente para terrenos poco homogéneos o con poca capacidad portante, cuya misión es soportar y repartir las cargas al terreno, generalmente a estratos más resistentes. Son elementos longitudinales

(columnas esbeltas) con sección generalmente de carácter circular. A su vez, los micropilotes son una tipología de pilotes con sección circular de pequeño diámetro [6].

Además, se conoce como cimentación profunda a aquel elemento estructural que recibe las cargas de la estructura y las transmite a un terreno situado a cierta profundidad capaz de recibir dichas cargas. A efectos del CTE, más concretamente del DBSE-C en su apartado 5 Cimentaciones profundas, se establecen las siguientes definiciones [4]:

- 1- Se considera a una cimentación como profunda si su extremo inferior, se encuentra a una profundidad mayor a 8 veces su diámetro o ancho.
- 2- La utilización de estas cimentaciones se contemplará en caso de que la ejecución de una cimentación superficial no sea técnicamente viable.
- 3- Las cimentaciones profundas se pueden clasificar en los siguientes tipos:
 - **Pilote aislado:** aquel que se encuentra suficientemente alejado de los otros pilotes como para que no tenga interacción geotécnica con ellos.
 - **Grupo de pilotes:** son aquellos en las que debido a 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 los asentamientos 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.
 - **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.

El empleo de pilotes es muy diverso, apostar por estos resulta apropiado en casos como los siguientes [6]:

- a) Cuando la carga transmitida por las estructuras no puede ser distribuida en el terreno de forma uniforme mediante el empleo de sistemas de cimentación directa como zapatas o losas.
- b) Cuando el nivel del firme no puede ser alcanzado de forma sencilla o se encuentra a gran profundidad.
- c) Cuando los estratos superiores del terreno son poco consistentes hasta cotas profundas, contienen gran cantidad de agua o bien se necesita cimentar por debajo del nivel freático.

- d) Cuando se prevea que los estratos inmediatos a la superficie de cimentación pueden determinar asientos imprevisibles de cierta importancia.
- e) Si se quiere reducir los posibles asientos de la edificación.
- f) En presencia de grandes cargas y concentradas.
- g) Si las distintas capas superficiales de los terrenos pueden sufrir variaciones estacionales como hinchamientos, retracciones, etc.
- h) En edificaciones sobre el agua.
- i) Cimientos solicitados a tracción.
- j) Para recalzar cimientos existentes.

3.2.2. Los pilotes como elementos de refuerzo del terreno

Mientras que la soluciones de bulonado o anclaje de terreno suelen trabajar principalmente a tracción (o a corte si el objetivo del refuerzo es funcionar como llave de cortante en superficies de deslizamiento), los micropilotes o los pilotes helicoidales tienen capacidad resistente tanto a compresión como a tracción, flexión y corte. Estas posibilidades mecánicas unidas a que pueden ejecutarse con maquinaria de tamaños muy diversos y en direcciones muy variadas, convierten a este tipo de solución en una de las más versátiles entre las técnicas de refuerzo [7].

3.2.2.1. Aplicaciones

Estos elementos suelen utilizarse, principalmente, en trabajos de cimentación o recalce de estructuras en terrenos problemáticos o poco competentes, estabilización o contención de taludes, protección de frentes de avance de túneles (en forma de paraguas con trabajo en voladizo), etc [7].

En la Ilustración 4, puede verse un tratamiento con columnas de mortero, realizadas por pilotes de barrera helicoidal continua, en los que el mortero se inyecta por el hueco central de la barrera. En esta intervención, se ha armado un relleno antrópico (heterogéneo, deformable y colapsable) sobre la traza de una tuneladora, a fin de evitar la inestabilidad de este terreno y evitar un gran socavón (Línea 8 del Metro y By-Pass Sur de Madrid, por ejemplo) [1].

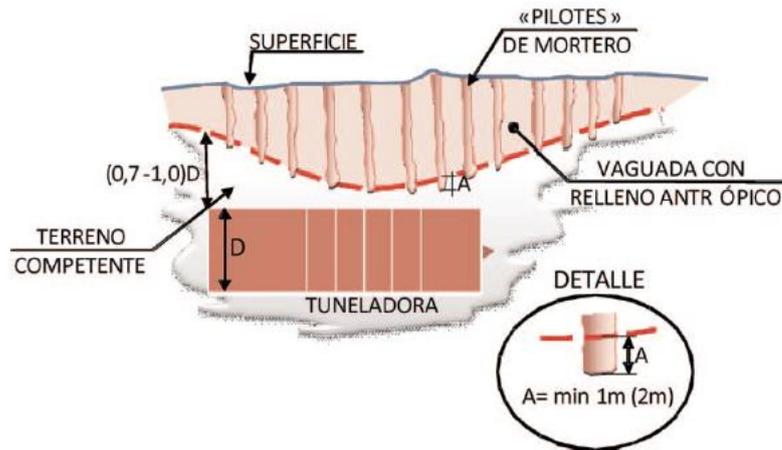


Ilustración 4. Refuerzo con pilotes de mortero sobre la traza de una tuneladora [1].

Además, sus aplicaciones como recalce son numerosas, entre ellas destacan [8]:

- **Recalce profundo mediante pilotes que rodean la cimentación:** Esta técnica se utiliza para transferir las cargas de grandes macizos a firmes muy profundos, sobre todo cuando hay que atravesar estratos débiles o con agua.
- **Recalce profundo mediante pilotes especiales bajo la cimentación:** Esta operación consiste en reparar la cimentación actuando por debajo la misma.
- **Recalce de pilotes mediante la ampliación del número de pilotes:** Esta técnica consiste en la construcción de pilotes del mismo tipo, a la misma o mayor profundidad que la de los existentes. Los pilotes se deben situar de forma simétrica y a una distancia mínima de los antiguos.
- **Pilotes que atraviesan cimentaciones ya existentes:** es muy usual en este tipo de recalces el empleo de micropilotes.

3.2.3. Tipologías de pilotes

A continuación, se procederá a clasificar los pilotes atendiendo a varios aspectos, como su forma de trabajo, tipo de materiales empleados en su fabricación, geometría de su sección transversal y su procedimiento constructivo.

3.2.3.1. Por la forma de trabajo

Atendiendo al CTE [4], en cuanto a la forma de trabajo o al mecanismo que emplean para transmitir esfuerzos, los pilotes se clasifican en (ver Ilustración 5):

- **Pilotes por fuste:** en aquellos terrenos en los que, al no existir un nivel claramente más resistente, al que transmitir la carga del pilotaje, este 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”.

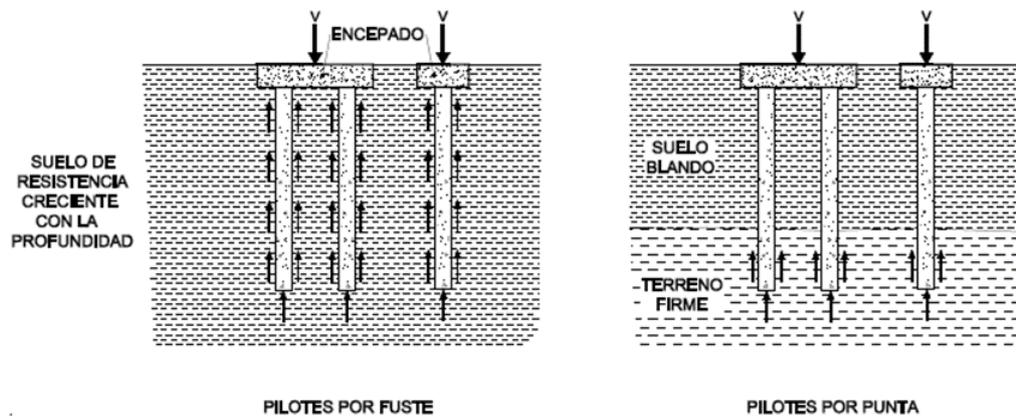


Ilustración 5. Clasificación de los pilotes por su forma de trabajo [4].

3.2.3.2. Por el tipo de material

Atendiendo al CTE [4], para la construcción de pilotes se podrán utilizar los siguientes materiales:

- **Hormigón “in situ”:** se ejecutarán mediante excavación previa, aunque también podrán realizarse mediante desplazamiento del terreno o con técnicas mixtas (excavación y desplazamiento parcial).
- **Hormigón prefabricado:** podrá ser hormigón armado (hormigones de alta resistencia) u hormigón pretensado o postensado.
- **Acero:** se podrán utilizar secciones tubulares o perfiles en doble U o en H. Los pilotes de acero se deben hincar con azuches (protecciones en la punta) adecuados.
- **Madera:** se podrá utilizar para pilotar zonas blandas amplias, como apoyo de estructuras con losa o terraplenes.
- **Mixtos:** acero tubular rodeados y rellenos de mortero.

3.2.3.3. Por el procedimiento constructivo

Atendiendo al modo de colocar los pilotes en el terreno, el CTE [4] establece dos tipos:

- **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. Las principales desventajas y ventajas de estos pilotes son [6]:
 - Su peso y longitud presentan problemas de transporte.
 - Tienen menor resistencia al rozamiento que los que se hacen “in situ”.

- Ofrecen mayores garantías al estar ejecutados en taller.
 - Las trepidaciones y conmoción que produce en el terreno durante la hincada pueden tener efectos perjudiciales sobre los edificios próximos.
- **Pilotes hormigonados “in situ”**: son aquellos que se ejecutan en excavaciones previas realizadas en el terreno. Las principales ventajas de los pilotes ejecutados “in situ” son [6]:
 - No se desaprovecha material.
 - El transporte resulta más barato.
 - La maquinaria es más sencilla y su transporte menos complejo.
 - El rozamiento entre el pilote y el terreno es mucho mejor.
 - Se puede ensanchar la punta del pilote para mejorar su capacidad portante a tracción.
 - La construcción del pilote “in situ” es menos ruidosa que para los pilotes hincados.

Es importante destacar que la mayoría de las cimentaciones profundas utilizan como material el hormigón “in situ”, pues resuelven un gran número de problemas, entre ellas, el transporte y montaje resulta más sencillo y barato, además, en su puesta en obra se consigue menor ruido y una menor vibración del terreno, por lo que no afectará a estructuras colindantes. Por último, destacar la gran versatilidad de los pilotes hormigonados in situ, pues a diferencia de los hincados, permiten ser ejecutados en una amplia variedad de terrenos, ya que los pilotes hincados no son adecuados para ser ejecutados en terrenos muy heterogéneos y blandos.

3.2.4. Tipologías de pilotes in situ según el procedimiento de ejecución

Según el procedimiento de ejecución, los pilotes hormigonados in situ se pueden dividir en dos grandes grupos: pilotes de desplazamientos y pilotes de extracción. En el primero de ellos, el pilote es introducido dentro del terreno, en el segundo, el terreno es extraído antes del hormigonado [6].

3.2.4.1. Pilotes de desplazamiento

Los pilotes de desplazamiento se instalan sin extracción de material. Están constituidos total o parcialmente, por elementos que se introducen en el suelo sin excavación, aunque también pueden ser empujados o atornillados. En este grupo se encuentran los pilotes de desplazamiento con azuche, los pilotes de desplazamiento con tapón de gravas u hormigón y los pilotes roscados sin extracción del terreno [9].

3.2.4.1.1. Pilotes de desplazamiento con azuche

El pilote de desplazamiento con azuche (pilotes CPI-2 en la nomenclatura de las Normas Tecnológicas de Edificación, NTE), consiste en un tubo de acero hincado en el terreno con un azuche de punta cónica o plana en su extremo inferior, que puede ser metálica o de hormigón prefabricado. Se recupera la tubería, si es preciso mediante vibradores, dejando el azuche o tapa perdido. El pilote se ejecuta sin extracción de terreno, por lo que no puede comprobarse la naturaleza del suelo que se va atravesando [9].

Su uso habitual es como pilotaje de poca profundidad trabajando por punta, apoyado en roca o capas duras de terreno, tras atravesar capas blandas. En terrenos granulares de medios a flojos, o con capas alternadas coherentes y granulares de alguna consistencia, trabaja por fuste y punta. Se emplean diámetros pequeños (entre 30 y 65 cm) en terrenos resistentes, pero poco estables. [9]

En la Ilustración 6, se muestra de una forma simplificada las siguientes fases de ejecución de este tipo de pilote:

1. Puesta en obra y colocación de un azuche metálico o tapón en la base.
2. Hincado de tubería hueca y azuche mediante golpeo con maza o martillo hasta llegar al rechazo.
3. Colocación de la armadura hasta el fondo del pilote.
4. Hormigonado en seco.
5. Extracción de la camisa, dejando el azuche o tapa perdido.

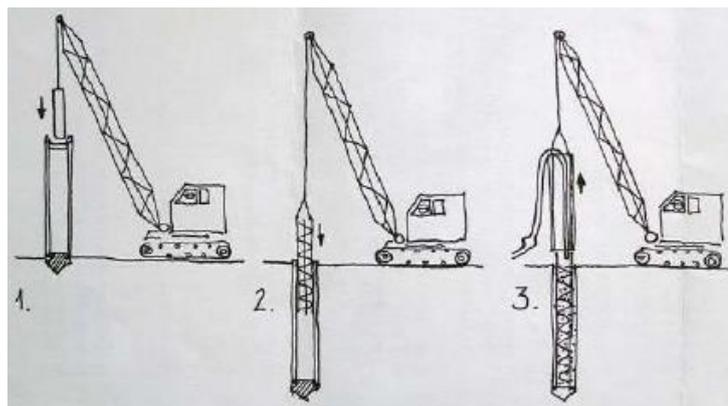


Ilustración 6. Hincado de la entubación de pilote de desplazamiento con azuche [6].

3.2.4.1.2. Pilotes de desplazamiento con tapón de gravas u hormigón

El pilote de desplazamiento con tapón de gravas, CPI-3, según las NTE, presenta características similares al CPI-2. La perforación se realiza mediante la hincado de una tubería de acero con la boca inferior cerrada con un tapón de gravas. La maza golpea por el interior de la tubería sobre las gravas,

que arrastra la tubería hacia el interior del terreno hasta llegar a la profundidad requerida, donde el tapón queda perdido. El golpe de maza desaloja el tapón del tubo y queda una base ensanchada en la punta del pilote. Al ser un pilote hincado, la perforación se realiza sin extracción de residuos. Los diámetros utilizados son de 30 y 65 cm [9].

Este método es utilizado debido a su alta capacidad de carga y tracción, y los bajos niveles de ruido y las vibraciones del suelo. Su uso habitual es como pilotaje trabajando por fuste en terrenos granulares de compacidad media o en terrenos con capas alternadas coherentes y granulares de alguna consistencia. Sin embargo, no se recomienda su uso en suelos cohesivos, donde la compactación de la base no es factible [9].

En la Ilustración 7, se muestran las fases constructivas de este tipo de pilote:

1. Ejecución de tapón de gravas, arena y hormigón dentro de la entubación dispuesto en tongadas pequeñas y fuertemente compactado.
2. Golpeo sobre el tapón para arrastrar la entubación hasta la cota requerida.
3. Golpeo del tapón y extracción de la entubación para desalojo de este, quedando como punta del pilote un ensanche.
4. Colocación de la armadura dentro de la entubación.
5. Extracción de la entubación a la vez que se va hormigonando por tongadas.

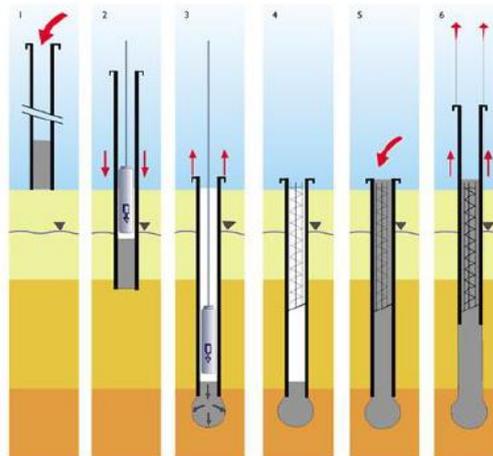


Ilustración 7. Procedimiento constructivo de un pilote con tapón de gravas [6].

3.2.4.1.3. Pilotes roscados sin extracción de terreno

Una forma diferente de introducir la camisa en el terreno es el roscado. En la ilustración 8 se muestra la ejecución de este tipo de pilotes. La única diferencia con los pilotes hincados hormigonados en obra es la forma de introducir el entubado [9].

Las fases constructivas (Ver Ilustración 8) de este tipo de pilote son:

1. El hueco de perforación se cierra de forma estanca mediante una cabeza especial de perforación.
2. A través de una mesa de rotación gira el taladro formado por la cabeza de perforación y el entubado.
3. Se coloca la armadura sobre la longitud del pilote.
4. Se hormigona hasta alcanzar la cota del terreno.
5. Se retira el entubado a través de la mesa de perforación, manteniendo un control constante del vertido del hormigón.

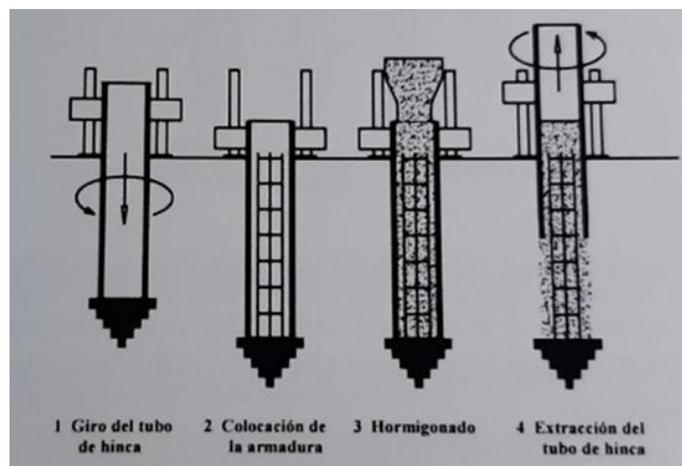


Ilustración 8. Ejecución de pilotes roscados sin extracción de terreno [9].

3.2.4.2. Pilotes de extracción

Se denominan pilotes de extracción (también conocidos como pilotes excavados o perforados) aquellos que, en su ejecución, se efectúa una perforación por extracción del terreno. Estos pilotes se hormigonan en obra. Respecto a los pilotes hincados o de desplazamiento, los pilotes de extracción presentan las siguientes ventajas [9]:

- Puede obtenerse muestras del terreno mientras se realiza la excavación.
- Pueden atravesarse con más facilidad estratos duros.
- Los sistemas de perforación producen mucho menos ruido y vibraciones. Así como, su maquinaria es más ligera y barata.
- Pueden alcanzarse mayores profundidades.

3.2.4.2.1. Pilote de extracción con entubación recuperable

El pilote de extracción con entubación recuperable, CPI-4 según las NTE, es un tipo de pilote perforado y hormigonado en obra con una tubería de sostenimiento metálica denominada camisa. Se recomienda para terrenos que por su baja consistencia o por la presencia de nivel freático sufren

desprendimientos y se desmoronan durante la excavación, o cuando aparecen deformaciones excesivas. Este tipo de pilotes es muy útil en empotramientos en roca, pilotes a perforar en zonas con bolos, estratos cementados, e incluso en zonas con rellenos muy heterogéneos como escolleras [9].

Trabaja como pilotaje de poca profundidad por punta, apoyado en roca, así como pilotaje trabajando por fuste en terreno coherente firme, prácticamente homogéneo. Este sistema elimina de forma efectiva las fuertes vibraciones en el terreno que se producen por la hincada de pilotes. Sin embargo, una de las desventajas más importantes es su elevado coste. Son habituales diámetros de 45 a 250 cm [9].

En la Ilustración 9, se muestra la ejecución de este tipo de pilotes que se puede resumir en las siguientes fases:

1. Posicionamiento de la tubería mediante entubadora.
2. Excavación con cazo o hélice conteniendo simultáneamente las paredes de la perforación con tubería.
3. Colocación de la armadura.
4. Hormigonado y extracción simultánea de la camisa.
5. Pilote terminado.

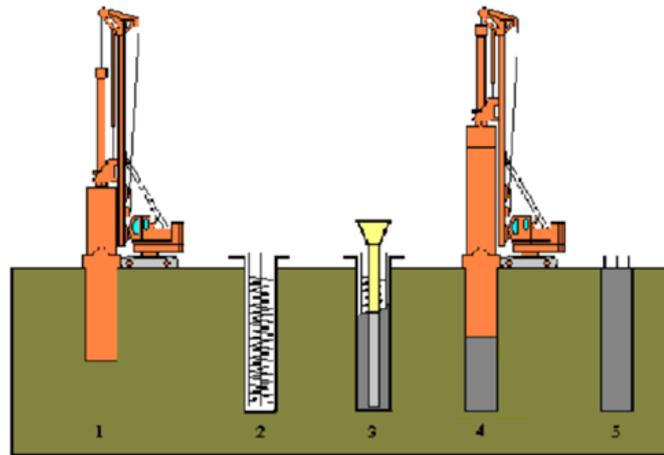


Ilustración 9. Proceso constructivo para un pilote de extracción con tubería recuperable [6].

3.2.4.2.2. Pilote de extracción con camisa perdida

El pilote de extracción con camisa perdida, CPI-5 según las NTE, constituye una variante del CPI-4 donde la camisa perdida se deja formando parte del pilote. La entubación protege el tramo del pilote donde el hormigón fresco se expone a un terreno agresivo o a un flujo de agua, por ello, a este pilote también se le denomina pilote blindado [9].

Este pilote suele trabajar por punta apoyado en estratos duros. No es habitual en edificación, aunque sí es frecuente en puerto o pantalanés. Los diámetros son los mismos que los del tipo CPI-4 [9].

Las fases de ejecución de este tipo de pilote son las siguientes (Ver Ilustración 10):

1. Excavación conteniendo las paredes de la perforación con tubería.
2. Colocación de la armadura.
3. Hormigonado, sin extracción de la tubería de revestimiento.

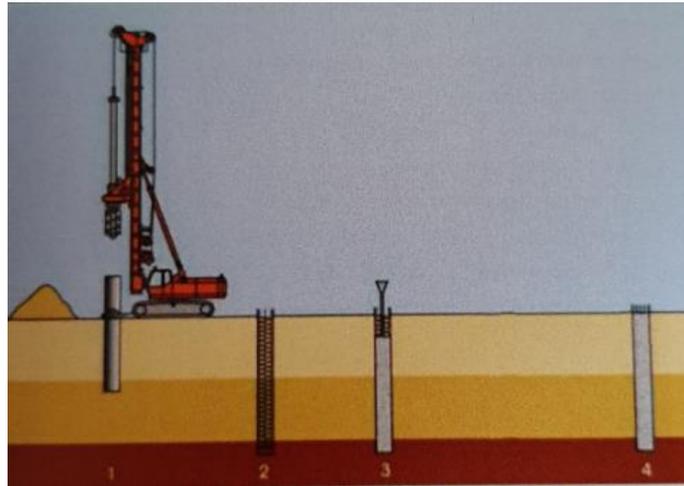


Ilustración 10. Fases de ejecución del pilote de extracción con camisa perdida [9].

3.2.4.2.3. Pilote perforado sin entubación con fluidos estabilizadores

El pilote perforado sin entubación con fluidos estabilizadores (o con lodos bentoníticos), CPI-6 según las NTE, se perfora al mismo tiempo que se vierten lodos que, gracias a sus propiedades expansivas y tixotrópicas, estabilizan las paredes de terrenos inestables o con nivel freático alto. Las bentonitas, una mezcla de arcilla de sílice y aluminio, presentan propiedades tixotrópicas y se hinchan con la humedad adhiriéndose a las paredes de la perforación formando una película impermeable. Los polímeros, de uso más reciente y de mayor costo, presentan propiedades iónicas que propician la adherencia entre el hormigón y el terreno. Aventajan a las bentonitas en que no precisan de gran espacio para su preparación [9].

Este procedimiento se aplica preferentemente en terreno finos sin estratos granulares gruesos libres de matriz fina o grandes bloques. La técnica fracasa cuando se deben atravesar estratos de gran permeabilidad, donde el lodo se pierde por el terreno. El pilote suele trabajar por punta apoyado en roca o capas duras de terreno, una vez ha atravesado capas blandas que se mantengan sin desprendimientos por efecto de los lodos [9].

El procedimiento es rápido y económico, resolviendo los inconvenientes de la extracción de la entubación y el condicionante del diámetro máximo a perforar. Los diámetros usuales abarcan desde 45 a 150 cm. No es desdeñable la complicación que supone el uso de los lodos a medida que aumenta la profundidad [9].

Lo que encarece este procedimiento es que requiere una central de tratamiento de lodos para controlar su calidad (viscosidad y contenido en finos) y la regeneración de los lodos contaminados. Para su limpieza se utilizan bombas de fondo que extraen el lodo sucio e incorporan el lodo regenerado. Pueden emplearse para ello sistemas de circulación directa (ver Ilustración 11) que introducen lodos frescos por la punta que desplazan al lodo contaminado, que sale por la cabeza, o sistemas de circulación inversa (ver Ilustración 12) que lo hacen aspirando el fluido contaminado del fondo y alimentan con lodo fresco por la cabeza [9].

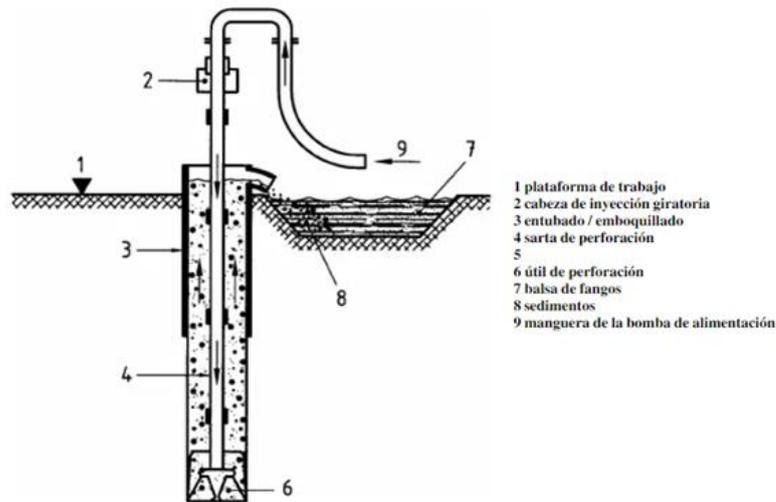


Ilustración 11. Método de perforación con circulación directa. UNE EN 1536 [9].

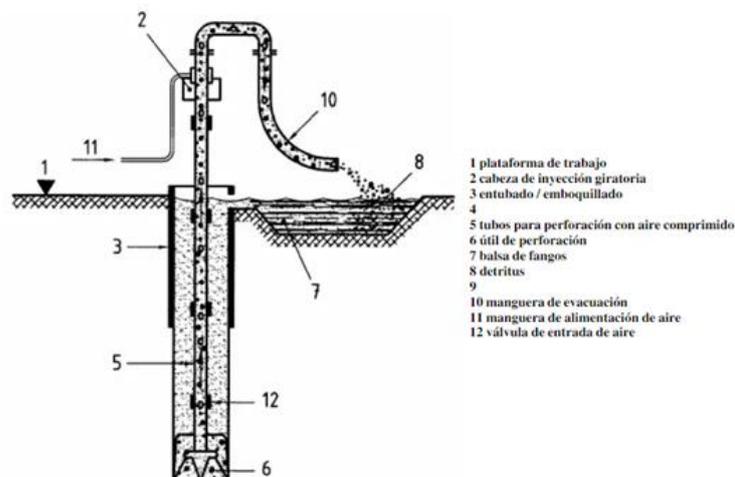


Ilustración 12. Método de perforación con circulación inversa. UNE EN 1536 [9].

En este tipo de pilote, se pueden distinguir las siguientes fases constructivas (Ver Ilustración 13):

1. Excavación con cuchara y vertido de lodo en la excavación para extracción de la tierra.
2. Cambio de lodo contaminado y limpieza del fondo del pilote.
3. Introducción de las armaduras.
4. Hormigonado desde el fondo y recuperación del lodo.
5. Pilote terminado.

Es importante destacar que, para estabilizar la perforación, el nivel del lodo debe mantenerse constante, por lo que se deben aportar lodos a medida que avanza la excavación.

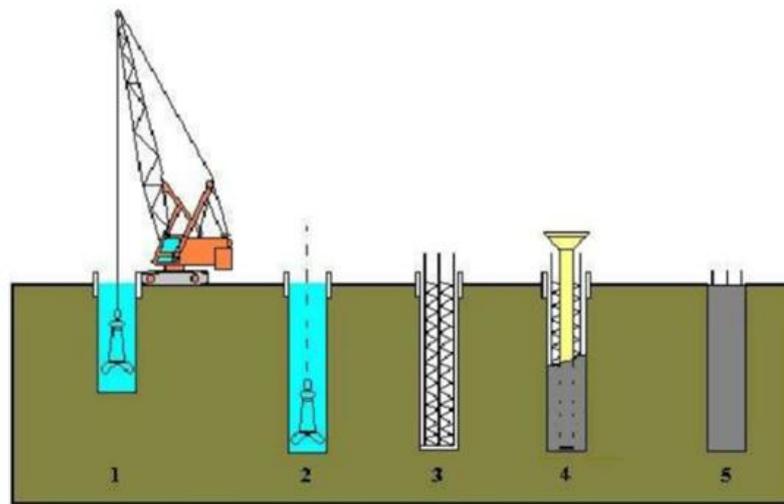


Ilustración 13. Fases constructivas para el pilote perforado sin entubación con fluidos estabilizadores [6].

3.2.4.2.4. Pilote de extracción con barrena sin entubación

Según las NTE, se denomina CPI-7 al pilote perforado a rotación en seco y hormigonado “in situ”, en los que debido a las características del terreno no precisa el sostenimiento de las paredes. Es un pilote rápido de ejecutar y económico, idóneo cuando el terreno está seco y es estable durante la perforación. Los diámetros habituales oscilan entre 45 y 250 cm [9].

Este pilote trabaja por punta apoyado en terreno coherente duro, aunque también lo puede hacer por fuste en terreno coherente firme, prácticamente homogéneo, o coherente de consistencia media en el que no se produzcan desprendimientos de las paredes [9].

Cuando las condiciones son favorables, se pueden conseguir rendimientos de 80 a 100 m por turno, no tiene competencia con otros sistemas, el pilote con lodos bentoníticos puede duplicar el coste [9].

El proceso de ejecución de los pilotes perforados en seco supone las siguientes fases (Ilustración 14):

1. Perforación mediante barrena hasta la cota deseada, sin ningún sistema de sostenimiento.
2. Extracción de la barrena y limpieza del fondo del pilote.
3. Colocación de la armadura en el interior de la excavación.
4. Hormigonado.
5. Terminación del pilote.

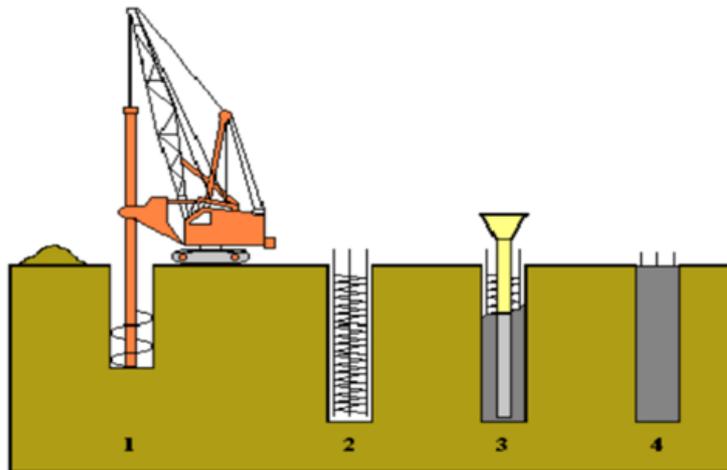


Ilustración 14. Pilote barrenado sin entubación [6].

Este tipo de pilotes presenta numerosas ventajas:

- Es rápido, de gran rendimiento.
- Al extraer el suelo, se ve lo que se excava, lo que permite tomar las decisiones más adecuadas.
- Se puede ver si el pilote se tuerce.
- Es sencillo cambiar los útiles de perforación según los requerimientos del terreno.
- El pilote se arma tras la excavación, con lo que la armadura se coloca mejor.

3.2.4.2.5. Pilote de extracción con barrena continua hueca

El pilote de barrena helicoidal continua, CPI-8 según las NTE, es un pilote de extracción sin entubación que se ejecuta mediante una hélice continua que se introduce por rotación hasta la profundidad prevista. Una vez introducida en el terreno se extrae el material alojado en los álabes de la barrena sin darle vueltas, y simultáneamente se hormigona a través del interior de la propia barrena [9].

Este pilote trabaja por punta apoyado en roca o en capas duras, aunque también puede hacerlo por fuste en terrenos de compacidad media, o en capas alternadas coherentes y granulares de alguna consistencia. El pilote resultante presenta resistencia por punta y rozamiento lateral, pues la superficie del fuste es irregular. Se trata de un pilote muy usado en España, siempre en terrenos flojos que no sean estables durante la perforación, como arenas o arcillas, incluso con gravas en presencia de nivel freático. Sin embargo, el sistema no puede atravesar estratos competentes [9].

Los diámetros comunes rondan entre los 35 y 70 cm. Es un sistema rápido, con rendimientos que pueden superar los 150 m por turno. El procedimiento es económico y no se producen vibraciones, lo cual es una ventaja en las obras de ampliación de edificios y recalces. Sustituye con ventaja a la perforación con lodos tixotrópicos cuando los diámetros no superan los 100 cm. Además, el sistema resuelve la duda si la excavación ha de realizarse en seco o con lodos [9].

En cuanto a las fases de ejecución (Ver Ilustración 15), se tiene:

1. Posicionamiento y aplome de la máquina para garantizar la verticalidad en la perforación mediante las guías de perforación.
2. Perforación mediante barrena continua telescópica por efecto de rotación y empuje vertical.
3. Bombeo del hormigón por el interior de la barrena y extracción simultánea de la misma, que lleva alojada en sus álabes el terreno perforado.
4. Colocación de la armadura en el hormigón fresco.

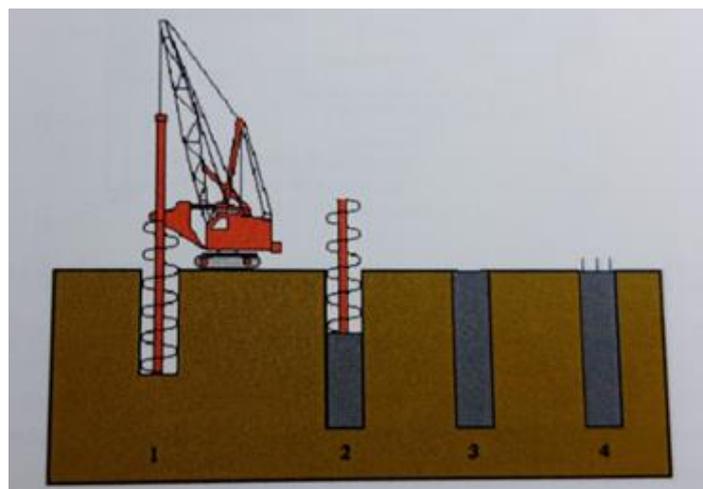


Ilustración 15. Fases de ejecución del pilote de extracción con barrena continua hueca [9].

Este tipo de pilotaje presenta numerosas ventajas que hacen que sea una tipología muy empleada. Entre sus ventajas, se encuentran:

- No es necesaria la entubación o los lodos en terrenos inestables, pues la propia barrena permite la contención del terreno.
- Puede ejecutarse en cualquier suelo blando, incluso por debajo del nivel freático.
- Se puede controlar la presión y el volumen de hormigonado.
- Permiten empotrar el pilote en estratos consistentes.
- Elevado rendimiento, lo que permite plazos de obra muy razonables.

A continuación, se muestra un esquema con la clasificación general de los pilotes (Ilustración 16), y otro específico para el procedimiento constructivo de los mismos (Ilustración 17), atendiendo a todo lo descrito con anterioridad:

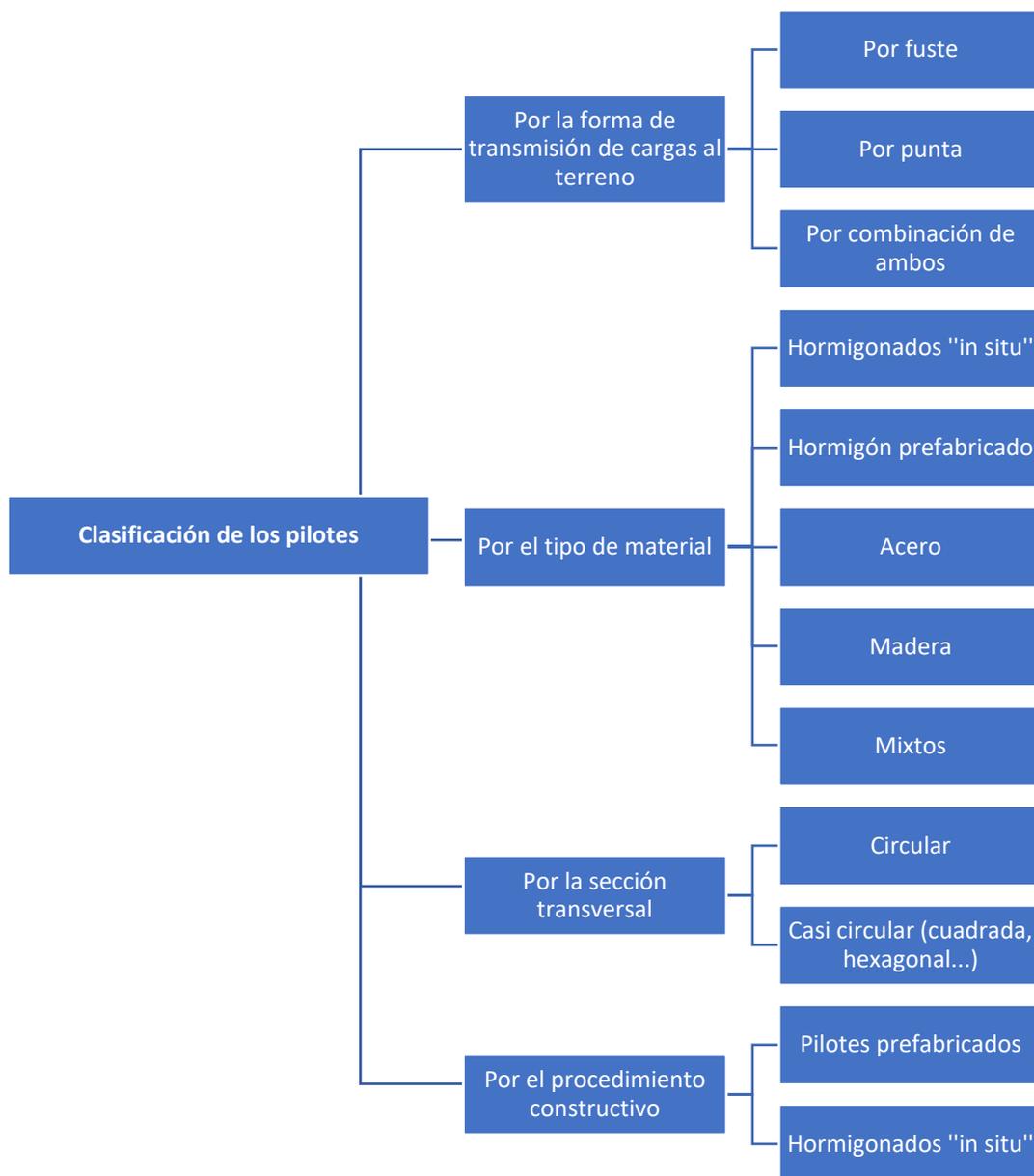


Ilustración 16. Esquema con la clasificación general de los pilotes.

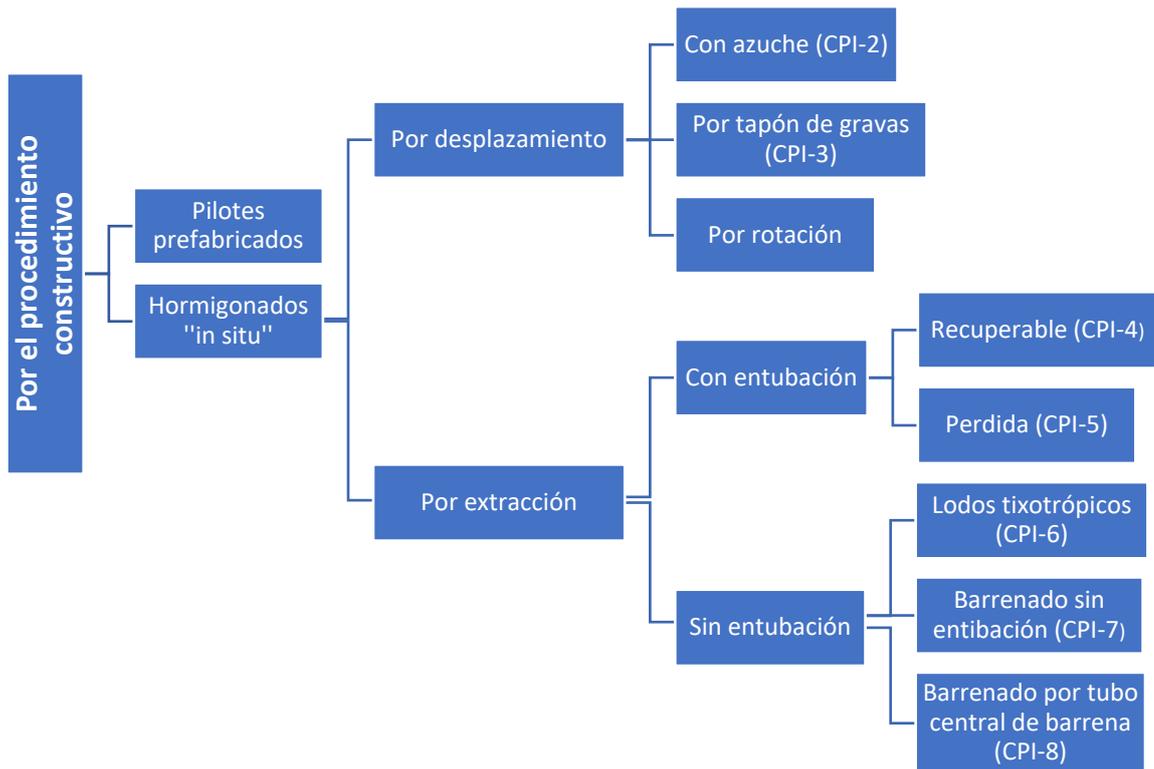


Ilustración 17. Clasificación de los pilotes atendiendo al procedimiento constructivo.

3.3. Criterios a tener en cuenta para elegir el tipo de pilotaje idóneo para un determinado tipo terreno

La elección del tipo de pilotaje a emplear va más allá de la rapidez y de lo económico que resulte el método de pilotaje. Dicha elección se fundamenta sobre todo en el tipo de terreno que se quiere armar, ya sea para cimentarlo o para reforzarlo. Por ello, se hace necesario conocer mínimamente las características del terreno. Las variables a tener en cuenta para la elección idónea del tipo de pilotaje atendiendo al suelo donde se va a pilotar son [10]:

- **Cohesión de las distintas capas:** este parámetro indica la estabilidad intrínseca del terreno. A mayor cohesión mayor probabilidad de que el terreno sea estable.
- **Terrenos duros (rocas):** La existencia de rocas o capas de rocas en terrenos dificultará con creces el poder atravesarlos, los pilotes de barrena continua y los prefabricados en estos casos están muy limitados. Para perforar estratos de rocas se necesitan herramientas especiales con dientes de Widia.
- **Compacidad de los suelos arenosos o arcillo-arenosos o arcillosos:** este parámetro también da una idea de la estabilidad del suelo. A mayor compacidad mayor probabilidad de estabilidad.

- **Porcentaje de finos en suelos granulares o matriz de estos suelos:** a mayor porcentaje de finos en el terreno mayor probabilidad de estabilidad, la cohesión está relacionada con la cantidad de materia arcillosa que contiene, y el porcentaje de finos mide la cantidad de arcilla y de limos, de esta forma, a mayor porcentaje de finos, mayor probabilidad de que esta sea arcilla, lo que implica un mayor grado de cohesión.
- **Existencia de agua:** el agua puede perjudicar en gran medida a la estabilidad.
- **Permeabilidad del terreno:** si el terreno es permeable el proceso de ejecución de pilotes con lodos bentoníticos se debe descartar. El coeficiente de permeabilidad (k) permite clasificar a los suelos según su permeabilidad, este coeficiente mide el flujo de fluido a través de los suelos, a menor coeficiente, más impermeable será el suelo [11].

Además, en función de la composición del terreno, también se puede estimar el coeficiente de permeabilidad del suelo, tal y como se muestra en la Tabla 1:

Tipo de suelo	K_z (m/s)
Grava limpia	$> 10^{-2}$
Arena limpia y mezcla de grava y arena limpia	$10^{-2} - 10^{-5}$
Arena fina, limo, mezclas de arenas, limos y arcillas	$10^{-5} - 10^{-9}$
Arcilla	$< 10^{-9}$

Tabla 1. Valores orientativos del coeficiente de Permeabilidad (Según el CTE [4], DBSE-C, en tu tabla D.28)

Todas estas variables pretenden dar información sobre la compacidad y la estabilidad del terreno. Además, para la elección del tipo de pilote es necesario tener en cuenta otros factores como son el espacio disponible para la maquinaria, existencia o no de edificios, la existencia de cavidades subterráneas o de cimentaciones antiguas [10].

Como ya se dijo anteriormente, lo fundamental para elegir el tipo de pilote a emplear es estudiar la estabilidad del terreno. Cuando el terreno es estable, es decir, es homogéneo, posee cohesión alta y no existe agua, el mejor pilote a ejecutar será el pilote barrenado sin entubación (CPI-7). Si por el contrario, el terreno es inestable, habrá que estudiar donde se encuentra dicha inestabilidad, así como los componentes que forman el suelo, para estos terrenos inestables se puede emplear cualquiera de los otros tipos de pilotes (CPI-4, CPI-5, CPI-6, CPI-8), la elección de uno u otro dependerá principalmente de la composición del suelo [10].

3.3.1. Resumen de los tipos de pilotajes idóneos para los distintos tipos de terrenos

En la siguiente tabla (Tabla 2) se muestra un resumen de la aplicabilidad de los distintos tipos de pilotes atendiendo a los diferentes terrenos que se pueden presentar, así como, se detallan otras características como los diámetros más usuales de cada tipología de pilotajes, además de algunas observaciones extras que tratan sobre la rapidez de ejecución (rendimientos) y vibraciones producidas entre otros. Dicha tabla se ha realizado como resumen a lo que se ha expuesto en los anteriores apartados.

Tipo de pilotaje	Tipo de terreno	Forma de trabajo	Diámetro de pilote	Observaciones
Pilote de desplazamiento con azuche (CPI-2)	Terrenos resistentes, pero poco estables. Terrenos granulares de medios a flojos, o con capas alternadas coherentes y granulares de alguna consistencia.	Usualmente por fuste y punta o por punta cuando se encuentran apoyados en rocas.	30 – 65 cm	
Pilote de desplazamiento con tapón de gravas (CPI-3)	Terrenos granulares de compacidad media o en terrenos con capas alternadas coherentes y granulares de alguna consistencia.	Usualmente trabaja por fuste.	30 – 65 cm	Bajo nivel de ruido y vibraciones. No se recomienda en suelos cohesivos.
Pilote de extracción con entubación recuperable (CPI-4)	Inestabilidad en la parte superior. Terrenos inestables de baja consistencia que sufren desprendimientos durante la perforación (Presencia del nivel freático).	Usualmente trabaja por punta apoyado en rocas o capas duras.	45-250 cm	Rendimientos bajos (30-40 m/turno). No se usan cuando existen corrientes de aguas.
Pilote de extracción con camisa perdida (CPI-5)	Inestabilidad a cualquier profundidad. Terreno agresivo (químicamente). Se usan en presencia de fuertes escorrentías.	Usualmente trabaja por punta, apoyado en rocas o capas duras.	45-250 cm	Proceso costoso Rendimiento bajo (30-40 m/turno).
Pilote perforado sin entubación con fluidos estabilizadores (CPI-6)	Terrenos inestables en toda la perforación y compacidad baja o muy baja. Preferentemente terrenos finos sin estratos granulares gruesos libres de matriz fina o grandes bloques.	Usualmente trabaja por punta, apoyado en rocas o capas duras.	45-150 cm	Fracasan ante suelos de gran permeabilidad. Rendimientos similares a los CPI-4
Pilote barrenado sin entubación (CPI-7)	Terreno estable que no precisa el sostenimiento de las paredes	Por punta o por fuste si el terreno es coherente firme	45-250 cm	Altos rendimientos y coste bajo. 80-100 m/turno
Pilote de extracción con barrena continua hueca (CPI-8)	Terrenos flojos que no sean estables durante la perforación. Inestables en toda la perforación, compacidad baja o muy baja. Arenas, arcillas, gravas en presencia de nivel freático.	Por fuste y punta	35-85 cm	Altos rendimientos (150 m/turno) Económico Sistema más usado en España No produce vibraciones

Tabla 2. Tabla-resumen de los tipos de pilotajes idóneos para los distintos tipos de terreno.

4. Solución adoptada

4.1. Parcela elegida

La parcela escogida se trata de un terreno de relleno, con clasificación desfavorable según el CTE, considerado como un suelo blando con bajas características portantes como para construir encima de él, de ahí la necesidad de reforzarlo. Su situación geográfica ya se describió en el apartado 1.3. de la presente memoria. La justificación de su elección y de las características que se le asignaron, se encuentran justificadas en el Anexo I del presente trabajo. Esta parcela se reforzará haciendo uso de la técnica de pilotaje, con el objetivo de encontrar y analizar las soluciones y configuraciones de pilotes idóneas para su refuerzo. Todo ello, atendiendo a los dos aspectos claves que se presentan en cualquier técnica de mejora o refuerzo del terreno, dichos aspectos son: la ganancia de rigidez que se obtiene al armarlo, y el coste que supondría realizar dicho refuerzo con la técnica de pilotaje que se seleccione (esta elección se explica en el siguiente apartado 4.2).

4.2. Técnica de pilotaje elegida para armar el suelo

Teniendo en cuenta que se tiene que armar un relleno antrópico con pilotes, se presenta la necesidad de elegir un tipo de pilotaje para llevar a cabo esta operación de armado del terreno. Sabiendo que esta tipología de suelo es blanda, con una composición muy heterogénea compuesta de variedades de bolos, gravas, arenas y limos, hay que buscar la técnica de pilotaje que se adapte mejor a estas características. Sin olvidar tampoco, la importancia del coste económico, pues no es susceptible realizar una operación demasiado costosa para reforzar un terreno, ya que, para eso, se optaría por ejecutar algún tipo de cimentación profunda y no por la de refuerzo del terreno.

Atendiendo a las características del terreno, al tratarse de un suelo blando, se optará por algún pilote de extracción, se descarta, por tanto, los pilotes de desplazamiento, pues, como ya se explicó anteriormente, los pilotes de extracción ofrecen una maquinaria más ligera y barata, lo que los hacen más versátiles en su ejecución. Además, los pilotes de extracción provocan pocas vibraciones, al ser el suelo seleccionado muy heterogéneo, interesa producir pocas vibraciones en el mismo. A todo esto, también hay que añadir que los pilotes de extracción permiten obtener muestras del terreno mientras se realiza la excavación, un aspecto de suma importancia cuando la composición del suelo es heterogénea.

Dentro de este grupo (pilotes de extracción), también se puede prescindir del pilote perforado sin entubación con fluidos estabilizadores (CPI-6). Como ya se mencionó en los apartados anteriores, este tipo de pilotes no es adecuado para terrenos permeables. Como los terrenos de relleno poseen un gran contenido en gravas, hace que el terreno sea permeable, lo que hará que los pilotes

perforados con fluidos estabilizadores no sean adecuados para esta tipología de suelos. Además, también se puede desechar la opción del pilote con barrena sin entubación (CPI-7), pues este pilote se emplea cuando el terreno es estable, el terreno de relleno, al ser blando y heterogéneo, no es estable.

De esta forma, quedan como posibilidades el pilote de extracción con entubación recuperable (CPI-4), el pilote de extracción con camisa perdida (CPI-5) y el pilote de extracción con barrena continua hueca (CPI-8). Estos tres se podrían emplear para armar el terreno de relleno, sin embargo, los pilotes de extracción con entubación recuperable (CPI-4) y el pilote de extracción con camisa perdida (CPI-5), poseen rendimientos muy bajos y altos costes de ejecución. Por ello, se elegirá el pilote de extracción con barrena continua hueca (CPI-8), que posee rendimientos muy altos y un coste económico bastante bajo. Como ya se explicó anteriormente, este tipo de pilotes se emplea en terrenos blandos, y no es necesaria la entubación o los lodos, pues la propia barrena permite la contención del terreno. En el documento Presupuestos de los Pilotes Estudiados del presente trabajo, se demuestra que el método de ejecución por entubación recuperable (CPI-4) es mucho más costoso económicamente hablando que el método de ejecución por barrena continua hueca (CPI-8), de ahí a que se haya elegido este método de ejecución para armar el terreno.

5. Referencias

- [1] – Mazo, C. O., & Escobar, J. O. (2012). Innovaciones recientes en el campo de la mejora y refuerzo del terreno. *Revista de Obras Públicas*, 159(3.534).
- [2] – Meneses, G. M. Á. (2018). *Dynamic response of piled structures. Implementation of a model based on the integral formulation of the problem and the use of a fundamental solution for the layered half space* (Doctoral dissertation, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria).
- [3] – Coronilla Osorio, I. N. (2017). *Estudio de la mejora de terreno mediante columnas suelo-cemento tipo Mixpile*.
- [4] – CTE. Código Técnico de la Edificación, en su documento básico: DB-SE-C, Documento Básico, Seguridad Estructural, Cimientos.
- [5] – MINISTERIO DE FOMENTO. (2002). “Guía de Cimentaciones” Dir. Gen. Carreteras.
- [6] – Apuntes de la asignatura “Construcción y arquitectura industrial”, tema de cimentaciones impartida en la Escuela de Ingenieros Industriales y Civiles de la ULPGC (EIIC).

[7] – Ingeoexpert. (2017). Los micropilotes y sus aplicaciones como técnica de mejora del terreno. Ingeoexpert. Consultado el 15 de marzo de 2020 en: <https://ingeoexpert.com/blog/articulo/los-micropilotes-aplicaciones-tecnica-mejora-del-terreno/?v=7516fd43adaa>

[8] – (2019). Patología de la edificación/Cimentaciones/Superficiales/Reparación. Wikilibros. Consultado el 15 de marzo de 2020 en https://es.wikibooks.org/wiki/Patolog%C3%ADa_de_la_edificaci%C3%B3n/Cimentaciones/Superficiales/Reparaci%C3%B3n

[9] - Yepes Piqueras, Víctor. (2016). Procedimientos de construcción de cimentaciones y estructuras de contención. Editorial Universitat Politècnica de València.

[10] – Pérez Carballo, Pedro. (2010). Implementación informática para el cálculo de pilotes de hormigón “in situ” según el CTE. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Sevilla. Proyecto de fin de estudios (Ingeniería Industrial).

[11] – Wikipedia. (2019). Coeficiente de permeabilidad. Consultado el 16 de marzo de 2020, en https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_permeabilidad

ESTUDIO PARAMÉTRICO Y DE APLICACIÓN

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE SUELOS ARMADOS CON TÉCNICA DE PILOTAJE. APLICACIÓN
EN TERRENOS DE RELLENO EN GRAN CANARIA.

ÍNDICE

1. Estudio paramétrico	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Descripción del estudio	1
1.3. Datos y parámetros del estudio	2
1.4. Variables a estudiar	8
1.5. Prueba inicial de convergencia	10
1.6. Análisis de las gráficas obtenidas	12
1.6.1. Representaciones u_0/u_p vs D-S	14
1.6.2. Análisis de los resultados u_0/u_p vs D-S	17
1.6.3. Representaciones u_0/u_p vs L-D	18
1.6.4. Análisis de los resultados u_0/u_p vs L-D	21
1.6.5. Representaciones u_0/u_p vs L-S	22
1.6.6. Análisis de los resultados u_0/u_p vs L-S	25
1.6.7. Representaciones u_0/u_p vs S-D	26
1.6.8. Análisis de los resultados u_0/u_p vs S-D	29
1.6.9. Nube de puntos u_0/u_p vs V_h/A	30
1.6.10. Nube de puntos u_0/u_p vs Coste por pilote/A	33
1.6.11. Análisis de los resultados para las nubes de puntos u_0/u_p vs V_h/A y u_0/u_p vs Coste por pilote/A	36
1.7. Conclusiones	37
2. Estudio de aplicación	39
2.1. Objetivos	39
2.2. Datos y parámetros del estudio	39
2.3. Búsqueda de las configuraciones idóneas	40
2.4. Representaciones	42
2.5. Análisis de los resultados	46
2.6. Conclusiones	47
3. Referencias	48

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Configuración 4x4 de pilotes.....	1
Ilustración 2. Malla regular de pilotes 6x6 en vista de planta.	6
Ilustración 3. Configuración regular 6x6 en vista alzada.	7
Ilustración 4. Área que se repite a lo largo de toda la malla de pilotes.....	10
Ilustración 5. Gráficas obtenidas en la prueba inicial de convergencia.....	11
Ilustración 6. Representación u_0/up vs D-S, para $C_s=80$ m/s.....	14
Ilustración 7. Representación u_0/up vs D-S, para $C_s=120$ m/s.....	15
Ilustración 8. Representación u_0/up vs D-S, para $C_s=160$ m/.....	16
Ilustración 9. Representación u_0/up vs L-D, para $C_s=80$ m/s.....	18
Ilustración 10. Representación u_0/up vs L-D, para $C_s=120$ m/s.....	19
Ilustración 11. Representación u_0/up vs L-D, para $C_s=160$ m/.....	20
Ilustración 12. Representación u_0/up vs L-S, para $C_s=80$ m/s.....	22
Ilustración 13. Representación u_0/up vs L-S, para $C_s=120$ m/s.....	23
Ilustración 14. Representación u_0/up vs L-S, para $C_s=160$ m/.....	24
Ilustración 15. Representación u_0/up vs S-D, para $C_s=80$ m/s.....	26
Ilustración 16. Representación u_0/up vs S-D, para $C_s=120$ m/s.....	27
Ilustración 17. Representación u_0/up vs S-D, para $C_s=160$ m/s.....	28
Ilustración 18. Representación u_0/up vs V_h/A , para $C_s=80$ m/s.	30
Ilustración 19. Representación u_0/up vs V_h/A , para $C_s=120$ m/s.....	31
Ilustración 20. Representación u_0/up vs V_h/A , para $C_s=160$ m/s.....	32
Ilustración 21. Representación u_0/up vs Coste por pilote/A, para $C_s=80$ m/s.....	33
Ilustración 22. Representación u_0/up vs Coste por pilote/A, para $C_s=120$ m/s.....	34
Ilustración 23. Representación u_0/up vs Coste por pilote/A, para $C_s=160$ m/s.....	35
Ilustración 24. Representación u_0/up vs Coste por pilote/A, para $C_s=80$ m/s.....	42
Ilustración 25. Mapa de colores para $u_0/up=1,75$ en $P(0,0,1)$	43
Ilustración 26. Mapa de colores para $u_0/up=1,50$ en $P(0,0,1)$	44
Ilustración 27. Mapa de colores para $u_0/up=1,25$ en $P(0,0,1)$	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resistencias medias y módulos de deformación de diferentes hormigones [3].....	4
Tabla 2. Propiedades mecánicas-elásticas de los pilotes.....	5
Tabla 3. Parámetros variables por analizar.....	6
Tabla 4. Propiedades de los distintitos tipos de suelos a estudiar.	8
Tabla 5. Características del terreno escogido.	40
Tabla 6. Configuraciones más económicas.	40

1. Estudio paramétrico

1.1. Objetivos

El objetivo de este apartado es realizar un estudio paramétrico, que trate de analizar y entender la influencia que tienen los aspectos más relevantes de la técnica de pilotaje en la mejora resistente del suelo. Estos aspectos más importantes hacen referencia a distintos parámetros, como lo son el diámetro y longitud de los pilotes, separación entre ellos y el perfil geotécnico del suelo.

1.2. Descripción del estudio

Para realizar este estudio, se adoptará una solución consistente en la colocación de una malla regular y simétrica de pilotes. De esta forma, se optará por una malla cuadrada de pilotes, con n pilotes en cada una de las n filas ($n \times n$), y se estudiará la influencia de los parámetros anteriormente comentados sobre las rigidizaciones que se obtienen en un cierto punto del terreno. Se eligió un número par de pilotes por fila y por columna, es decir, el número n será par. De esta forma, los ejes de coordenadas x e y , que ambos son ejes de simetría, estarán situados en medio de las dos filas y de las dos columnas centrales de la configuración de pilotes (Ilustración 1). Además, es importante aclarar que la malla de pilotes será totalmente regular, es decir, no se mezclarán pilotes con distintas características geométricas, esto es, todas las configuraciones que se estudiarán poseerán pilotes con los mismos diámetros, longitudes y separaciones entre ellos. En la Ilustración 1, se muestra una configuración simétrica de pilotes con una configuración 4×4 ($n=4$), además, se muestran los ejes de coordenadas x e y que definirán al suelo y a la malla de pilotes.

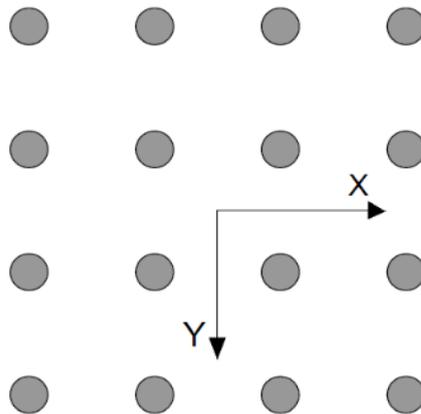


Ilustración 1. Configuración 4×4 de pilotes

En primer lugar, se definirán todos los datos necesarios para realizar el estudio, además de los distintos valores que tomarán los distintos parámetros a analizar. Posteriormente, se pasará a buscar la configuración de la malla de pilotes que represente a la totalidad de un suelo pilotado con

grandes dimensiones, o lo que es lo mismo, se tratará de buscar el número de pilotes (n), a partir del cual, las rigidizaciones que se obtienen para una configuración con un número de pilotes mayor son prácticamente iguales o muy parecidas. Esta búsqueda se realizará con una prueba de convergencia. El principal objetivo de esta primera búsqueda o prueba es claramente la de optimizar el uso del software, reduciendo los tiempos de cálculo del mismo sin perder precisión/fiabilidad en los resultados.

Una vez obtenida la configuración de pilotes, a partir de la cual, es suficiente como para estudiar la totalidad del suelo pilotado, haciendo uso siempre de esta configuración, se pasará a analizar la influencia que tienen los diversos parámetros sobre las rigidizaciones que se obtienen en la mejora del terreno, reflejando los resultados en gráficas para facilitar su comprensión. Además, se tratará de dar una idea de cuáles son las configuraciones de pilotes más adecuadas, para los distintos resultados de rigidización o de mejora del terreno atendiendo a aspectos económicos.

1.3. Datos y parámetros del estudio

En este apartado, se indicarán los datos que se consideraron para la realización del estudio paramétrico. Estos datos hacen referencia a las características mecánicas de los pilotes, condiciones de contorno de los mismos, zona y tipo de carga a la que estará sometida el suelo y punto del suelo donde se definirá el nivel de rigidización. Los demás datos corresponden a los distintos parámetros a estudiar, estos son: la separación entre pilotes, características geométricas de estos (diámetro y longitud) y las características mecánicas-elásticas del suelo (perfil geotécnico del suelo).

▪ Condiciones de contorno de los pilotes

Los pilotes no tendrán ninguna inclinación, se dispondrán totalmente verticales. En cuanto a sus condiciones de contorno, se establecerá que la punta y cabeza de los pilotes estarán libres, o lo que es lo mismo, sus puntas y cabezas no estarán sometidas a ninguna fuerza ni momento que impidan su movimiento ($F=0$ y $M=0$). De esta forma, los pilotes serán considerados como pilotes flotantes, pues la condición de punta asumida es la que caracteriza a este tipo de pilotes.

▪ Zona de carga del suelo

Para realizar el estudio de rigidización del suelo, será necesario aplicarle una carga al mismo, con el objetivo de analizar cuáles son los desplazamientos del suelo armado (u_p) y sin pilotes (u_0) tras aplicar la carga al terreno. La carga a la que se someterá el suelo será una carga superficial situada en el centro de la configuración de pilotes estudiada, esto es, en las coordenadas $(0,0,0)$. La carga superficial tendrá una geometría cuadra con dimensiones $0,3 \times 0,3 \text{ m}^2$. En cuanto al valor de la

carga, se tomarán en los cuatros nodos de la carga superficial 4 kN, este será el valor de la carga distribuida en cada nodo, de manera que se tendrán 4 kN repartidos a lo largo de toda la superficie cuadrada de $0,3 \times 0,3 \text{ m}^2$. Además, dicha carga estará dirigida en la dirección positiva del eje z, de manera que la carga comprimirá el terreno, más adelante, en la Ilustración 3, después de definir todos los datos y parámetros del estudio, se muestra todo esto ilustrativamente. La definición de esta carga se mantendrá igual para todos los casos de estudio.

Se adoptaron estas dimensiones en la definición de la carga, porque son las dimensiones más usuales cuando se determina el coeficiente de balasto de un suelo. El coeficiente de balasto es un parámetro que se define como la relación entre la presión que actúa en un punto y el asiento que se produce en este punto. Este parámetro no es una constante del terreno, pues a pesar de depender de las propiedades del suelo, también depende de las dimensiones del área que carga contra el terreno. Ante esta infinidad de posibilidades de cargar el terreno, lo más usual es que los laboratorios proporcionen el coeficiente de balasto para una placa cuadrada de carga, de 30 cm de lado [1].

En cuanto al valor de la carga escogido, aunque anteriormente se definió el valor seleccionado, no tiene importancia escoger un valor u otro, pues como ya se explicará en el apartado 1.4 de esta parte del trabajo, para cuantificar la ganancia de rigidez del suelo, es necesario comparar los resultados que se obtienen para el suelo sin armar con los resultados obtenidos para el suelo pilotado, de manera que si la carga definida para estos dos casos es siempre la misma, al comparar ambos valores se obtendrán resultados idénticos se adopte un valor u otro de la carga. De esta forma, dado que se está ante un problema lineal, los resultados serán siempre los mismos independientemente del valor de la carga asumida (siempre y cuando sea la misma para los problemas sin/con pilote).

- **Punto donde se calculará la rigidización**

El punto (P) donde se calculará la mejora resistente del suelo, estará situado un metro por debajo del centro de la configuración de pilotes, es decir, estará en la cota $P(0,0,1)$. No se eligió la cota $(0,0,0)$, porque el programa con el que se trabajará puede dar problemas cuando se calcula la solución en un punto muy cercano a la zona de carga, como consecuencia de la singularidad de colocar e integrar en el mismo punto para obtener la solución.

- **Características - propiedades mecánicas de los pilotes**

En cuanto a las propiedades de los elementos que rigidizarán al suelo, se hace necesario definir propiedades tales como su densidad, módulo de elasticidad longitudinal y coeficiente de Poisson.

Estas propiedades variarán en función del tipo de material del que esté compuesto el pilote. Para este estudio, se considerarán pilotes de hormigón en masa, por tanto, se considerarán las características más usuales de los mismos.

Atendiendo a la densidad del hormigón (ρ_h), para un hormigón bien compactado de áridos normales oscila entre 2300 - 2500 kg/m³. En caso de utilizarse áridos ligeros la densidad oscila entre 1000 - 1300 kg/m³. Y en caso de utilizarse áridos pesados la densidad oscila entre 3000 - 3500 kg/m³ [2]. Para este estudio se supondrá que se tiene un hormigón de áridos normales con una densidad de 2500 kg/m³. La consistencia del hormigón se considerará fluida para que pueda ser bombeado.

En cuanto al coeficiente de Poisson (ν_h), en el hormigón por lo general es siempre 0,2. Por último, en cuanto al módulo de deformación longitudinal del hormigón (E_h), este es más complejo de definir, pues el hormigón no posee rama elástica, lo que hace que su módulo de elasticidad sea variable, sin embargo, el que más se suele utilizar es el módulo de deformación longitudinal secante, que mediante las fórmulas propuestas por la EHE (Ec.1 , Ec.2 y Ec.3), se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 1 [3].

$$E_{0j} = 10.000 \cdot \sqrt[3]{f_{cm,j}} \quad (Ec. 1)$$

$$E_j = 8.500 \cdot \sqrt[3]{f_{cm,j}} \quad (Ec. 2)$$

$$f_{cm,j} = f_{ck} + 8 \quad (Ec. 3)$$

Donde:

- E_{0j} : es el módulo de deformación longitudinal inicial del hormigón.
- E_j : es el módulo de deformación longitudinal secante del hormigón.
- $f_{cm,j}$: es la resistencia media del hormigón a los 28 días en MPa.
- f_{ck} : es la resistencia característica a los 28 días en MPa.

f_{ck} (MPa)	$f_{cm,j}$ (MPa)	E_{0j} (MPa)	E_j (MPa)
25	33	$32,1 \cdot 10^3$	$27,3 \cdot 10^3$
30	38	$33,6 \cdot 10^3$	$28,6 \cdot 10^3$
35	43	$35 \cdot 10^3$	$29,8 \cdot 10^3$
40	48	$36,3 \cdot 10^3$	$30,9 \cdot 10^3$
45	53	$37,6 \cdot 10^3$	$31,9 \cdot 10^3$
50	58	$38,7 \cdot 10^3$	$32,9 \cdot 10^3$

Tabla 1. Resistencias medias y módulos de deformación de diferentes hormigones [3].

El hormigón que se escogerá será un hormigón en masa con resistencia característica (f_{ck}) de 35 MPa (HM-35), con un módulo de deformación longitudinal de $29,8 \cdot 10^3 \approx 30 \cdot 10^3$ MPa. A continuación, en la Tabla 2, se muestra una tabla resumen de las propiedades mecánicas escogidas para los pilotes.

Propiedades mecánicas-elásticas de los pilotes	
Material	HM-35
E_h (N/m ²)	$3 \cdot 10^{10}$
ν_h	0,2
ρ_h (kg/m ³)	2500

Tabla 2. Propiedades mecánicas-elásticas de los pilotes

▪ Valores de los parámetros a estudiar

En este subapartado se definen los valores de los diversos parámetros objeto de estudio, estos parámetros son el diámetro (D), la longitud (L) de los pilotes, la separación entre estos (S) y la velocidad de propagación de las ondas de cizalla del suelo (c_s), este último determina la dureza del terreno (perfil geotécnico del suelo).

Los valores que se estudiarán en cuanto a la velocidad de propagación de las ondas de cizalla (c_s) son: 80, 120 y 160 m/s. Así, se estudiarán tres terrenos blandos, con menor y mayor cohesión entre las partículas que lo forman: un terreno blando suelto ($c_s=80$ m/s), a este se le designará como Suelo 1; otro con un poco más de cohesión ($c_s=120$ m/s), a este se le llamará Suelo 2; y otro que podría ser considerado como un suelo blando medio cohesivo ($c_s=160$ m/s), a este se le nombrará como Suelo 3; en el Anexo I del presente trabajo se detalla la clasificación de los terrenos según la velocidad de propagación de las ondas de cizalla (Tablas 4, 5 y 6 del Anexo I).

En cuanto a los diámetros (D), se cogerán los valores más típicos de estos, que rondan entre los 35 y 100 cm. Sin embargo, se analizarán también algunos valores menores a 35 cm, para simular la capacidad de rigidización de micropilotes. Los diámetros escogidos son: 20, 30, 40, 50, 75 y 100 cm.

Atendiendo a los valores de las longitudes de los pilotes (L), se seleccionaron valores entre 2 y 10 metros. El valor de 2 metros quizás quede corto para diámetros superiores a 30 cm, pero resulta interesante incluirlo para analizar su comportamiento rigidizador con los diámetros más pequeños (micropilotes). De esta forma, las longitudes escogidas son: 2, 4, 6, 8 y 10 m.

Por último, las separaciones entre pilotes (S) seleccionadas son: 0,5, 1, 2, 3, 4 y 5 m. Para asegurar una distancia mínima entre pilotes, se impondrá la condición que la separación entre pilotes tiene

que ser como mínimo el doble del valor del diámetro, esto es: $S \geq 2 \cdot D$, así, se evitará que los pilotes queden muy juntos entre sí, puesto que cuando quedan muy juntos los efectos de esfuerzo de cada uno de ellos se traslapan, lo que produce que la capacidad portante de cada pilote por separado disminuya. Además, el disponerlos muy próximos entre sí, desde el punto de vista constructivo, armar el terreno con separaciones muy pequeñas entre pilotes (relación S/D pequeñas) viene a representar a hormigonar prácticamente la totalidad del suelo, algo que es inviable tanto desde el punto de vista de ejecución como económicamente hablando.

En la Tabla 3, se muestran todos estos parámetros variables que se estudiarán. Se analizarán todas las combinaciones posibles, de manera que se tendrá un total de 435 casos a analizar, 145 casos para cada tipo de terreno (c_s).

Parámetros variables que estudiar (Siempre que se cumpla $S \geq 2 \cdot D$)	
c_s (m/s)	80; 120; 160
S (m)	0,5; 1; 2; 3; 4; 5
L (m)	2; 4; 6; 8; 10
D (m)	0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,75; 1

Tabla 3. Parámetros variables por analizar.

A continuación, se muestran dos imágenes (Ilustración 2 y 3) donde se pueden apreciar una configuración de pilotes 6x6, donde se representan todo lo explicado en este apartado. En la Ilustración 2 se muestra los ejes de coordenadas x e y, la separación (S) entre pilotes, el diámetro (D) de estos, y la zona de aplicación de la carga que corresponde al cuadrado central ligeramente sombreado. En la Ilustración 3, se puede observar el eje z, la longitud (L) de los pilotes y el punto (P) donde se calcularán los desplazamientos.

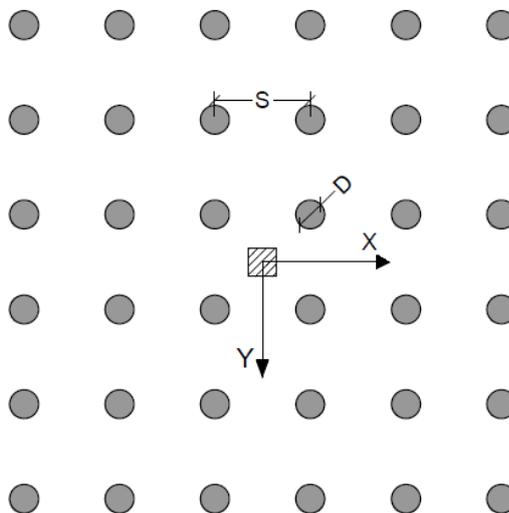


Ilustración 2. Malla regular de pilotes 6x6 en vista de planta.

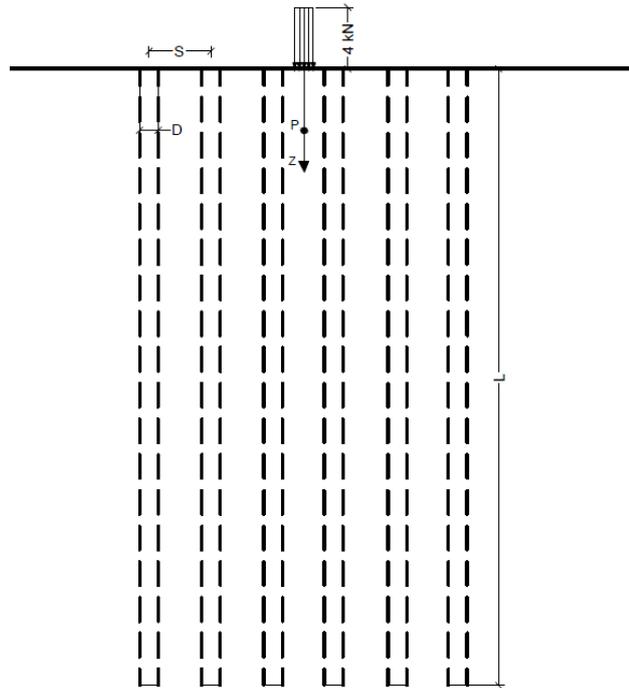


Ilustración 3. Configuración regular 6x6 en vista alzada.

▪ Características del terreno

El terreno que se escogió para este estudio paramétrico es un suelo natural que puede estar formado por gravas, arenas, limos y arcillas. Por ello, se escogió una densidad (ρ) de 1800 kg/m^3 , que es un valor que suele estar en el intervalo típico de densidades para cada uno de estos componentes que forman el suelo (en la Tabla 3 del Anexo I del presente trabajo se refleja esto). El coeficiente de Poisson (ν) que se le asignó al suelo es el típico de las arcillas blandas según el CTE (Tabla 2 del Anexo I) con un valor de 0,4.

Las demás propiedades del suelo, módulo de elasticidad longitudinal (E) y módulo de elasticidad transversal (G), se obtienen mediante los valores de la densidad (ρ), coeficiente de Poisson (ν) y de la velocidad de propagación de las ondas de cizalla (c_s) que definen el suelo, mediante aplicación de las ecuaciones de la elastodinámica (Ec.1 y Ec.2):

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (\text{Ec. 2})$$

Aplicando estas ecuaciones, se obtienen las siguientes propiedades (Tabla 4) para los tres distintos tipos de suelo:

Suelo	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
$c_s(m/s)$	80	120	160
ν	0,4	0,4	0,4
$\rho(kg/m)$	1800	1800	1800
$G(N/m^2)$	$1,152 \cdot 10^7$	$2,592 \cdot 10^7$	$4,608 \cdot 10^7$
$E(N/m^2)$	$3,2256 \cdot 10^7$	$7,2576 \cdot 10^7$	$12,9024 \cdot 10^7$

Tabla 4. Propiedades de los distintitos tipos de suelos a estudiar.

Con estos resultados, se verifica que el terreno denominado como Suelo 1 (c_s de 80 m/s) es un suelo blando, y se verifica también que los Suelos 2 y 3 (con c_s de 120 y 160 m/s respectivamente), son suelos algo más compactos. Para el Suelo 1 se obtiene una E entre 8-40 MN/m², este es el intervalo correspondiente a los suelos blandos; para el Suelo 2 se obtiene una E entre 40-100 MN/m², el intervalo correspondiente a suelos medios; y para el Suelo 3 se adquirió una E entre 100-500 MN/m², el intervalo correspondiente a suelos compactos. Todos estos intervalos se encuentran en la Tabla 1 del Anexo I. Sin embargo, a ninguno de ellos se les puede tratar como si fuesen terrenos medios o duros, los tres suelos definidos son generalmente blandos, de menor a mayor compacidad, ya que, sus respectivas c_s no superan los 200 m/s (Tablas 4, 5 y 6 del Anexo I).

Por otra parte, es importante destacar que, para todos los casos, el terreno se definirá como un semiespacio homogéneo.

1.4. Variables a estudiar

Para la realización y análisis del estudio se definirán varios ratios. Los ratios no son más que cocientes entre dos valores o variables, el objetivo de estos no es más que comparar los dos valores o variables elegidos entre sí, de manera que faciliten la comprensión de los resultados.

- **Ratio descriptivo de la ganancia de resistencia que experimentará el suelo**

El ratio elegido para analizar la ganancia resistente del suelo (Ec. 3), es el cociente formado por el desplazamiento que sufre el suelo sin armar (u_0) entre el desplazamiento del suelo pilotado (u_p), ambos desplazamientos serán los que se obtengan en el punto de estudio P(0,0,1). Este ratio será siempre mayor que la unidad, ya que, lógicamente, los desplazamientos del suelo sin pilotes serán mayores a los desplazamientos que se obtengan para el suelo armado. De esta forma, el valor resultante de este cociente, dará una idea de la ganancia de resistencia que experimenta el suelo al armarlo. Por ejemplo, si en la Ec.3 se obtuviera un ratio de 1,745, se tendría que el suelo con pilotes ha experimentado un desplazamiento que es un 1,745 veces inferior al desplazamiento que

se obtiene en el suelo sin pilotes. En términos de ganancia de rigidez, para este mismo ejemplo, se obtendría que la rigidez del suelo con pilotes (K_p), es un 74,5% mayor que la rigidez del suelo sin pilotes (K_0), ver Ec. 3.

$$\text{Ratio de desplazamientos: } \frac{u_0}{u_p} \rightarrow \frac{K_p}{K_0} = \frac{\frac{F}{u_p}}{\frac{F}{u_0}} = \frac{u_0}{u_p} \quad (\text{Ec. 3})$$

- **Ratios económicos**

Además de estudiar la influencia de los distintos parámetros variables definidos con anterioridad, también se tratará de analizar la eficiencia económica de los 145 casos posibles para cada tipo de suelo (c_s), de manera que resulte fácil visualizar cuáles son las configuraciones más baratas para un nivel de rigidización dado. Para ello, se definirán dos ratios económicos, uno de ellos es una aproximación económica pero que puede resultar útil cuando no se tiene un presupuesto aproximado, mientras que el otro que se mostrará sí es más exacto y necesita un presupuesto.

El primero de estos ratios, tratará de analizar el volumen de hormigón (V_h) que se tiene para un área determinado (A). El área escogida es el que se muestra en la Ilustración 4 (cuadrado contorneado azul), porque es la superficie que se repite a lo largo de toda la malla de pilotes, hasta el final de la misma. Como se aprecia, el volumen de hormigón presente en esta superficie es el correspondiente al de un pilote. Con este cociente (Ec. 4), se pretende estudiar lo económico que resulta cada configuración o caso de estudio, pues el m^3 de hormigón representa la unidad de obra más representativa en el coste de ejecución de un pilote, ya que los rendimientos de maquinaria y mano de obra van a depender de este. Así, con este ratio, a mayor volumen de hormigón (mayor D y L en los pilotes) y a menor separación (S) entre pilotes, mayor será el ratio y mayor tendría que ser el coste del refuerzo del terreno.

$$\text{Ratio de coste basado en el volumen de hormigón: } \frac{V_h}{A} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4 \cdot S^2} \quad (m) \quad (\text{Ec. 4})$$

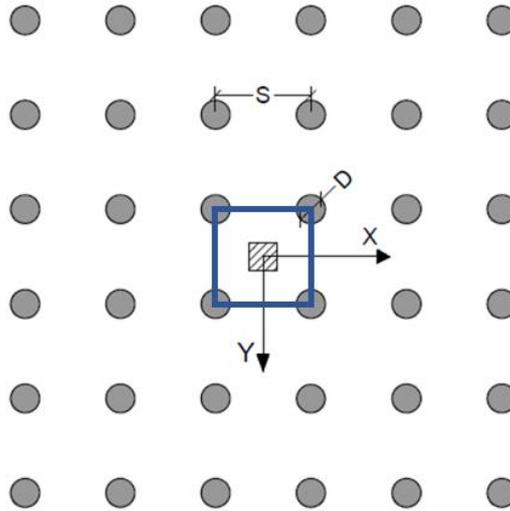


Ilustración 4. Área que se repite a lo largo de toda la malla de pilotes.

El segundo de estos dos ratios económicos, es muy parecido al anterior, este relacionará el coste por pilote con el mismo área que se describió en el anterior cociente (Ec.5). El coste por pilote para cada geometría del pilote (D y L) se detalla en la parte del presupuesto del presente trabajo.

$$\text{Ratio de coste por pilote: } \frac{\text{Coste por pilote}}{A} = \frac{\text{Coste por pilote}}{S^2} \left(\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right) \quad (\text{Ec. 5})$$

1.5. Prueba inicial de convergencia

En esta prueba, como ya se mencionó con anterioridad, se pretende buscar el número de pilotes (n) que caracterizará a la malla cuadrada de pilotes con la que se realizará el estudio paramétrico, y que a su vez, representará a la totalidad del suelo armado. Para hacer esta prueba, se escogió el suelo más blando anteriormente definido ($c_s=80$ m/s), la menor separación entre pilotes planteada ($S=0,5$ m), con su mayor diámetro ($D=0,2$ m, pues se tiene que cumplir que $S \geq 2D$) y longitud posible ($L=10$ m). Para esta prueba, se realizará una gráfica donde en el eje de ordenadas se presentarán los resultados de los ratios de desplazamientos en el punto de estudio $P(0,0,1)$, mientras que en el eje de abscisas se dispondrá el número de pilotes representativo de la configuración de la malla ($n \times n$). Se tomará como número de pilotes (n) las configuraciones: 2×2 , 4×4 , 6×6 , 8×8 , 10×10 y 12×12 . Se antoja escoger la separación menor entre pilotes para esta prueba, pues es bastante probable que se obtengan aquí grandes ratios de desplazamientos, y al obtenerse grandes valores de u_0/u_p se pueden producir más diferencias en los ratios de desplazamientos entre las distintas $n \times n$ configuraciones posibles, de manera que si para estos parámetros se encuentra la configuración $n \times n$ donde resulta insignificante seguir aumentando n, para todos los demás casos de estudio también lo será. En la Ilustración 5, se muestran la gráficas obtenidas para esta prueba inicial de convergencia.

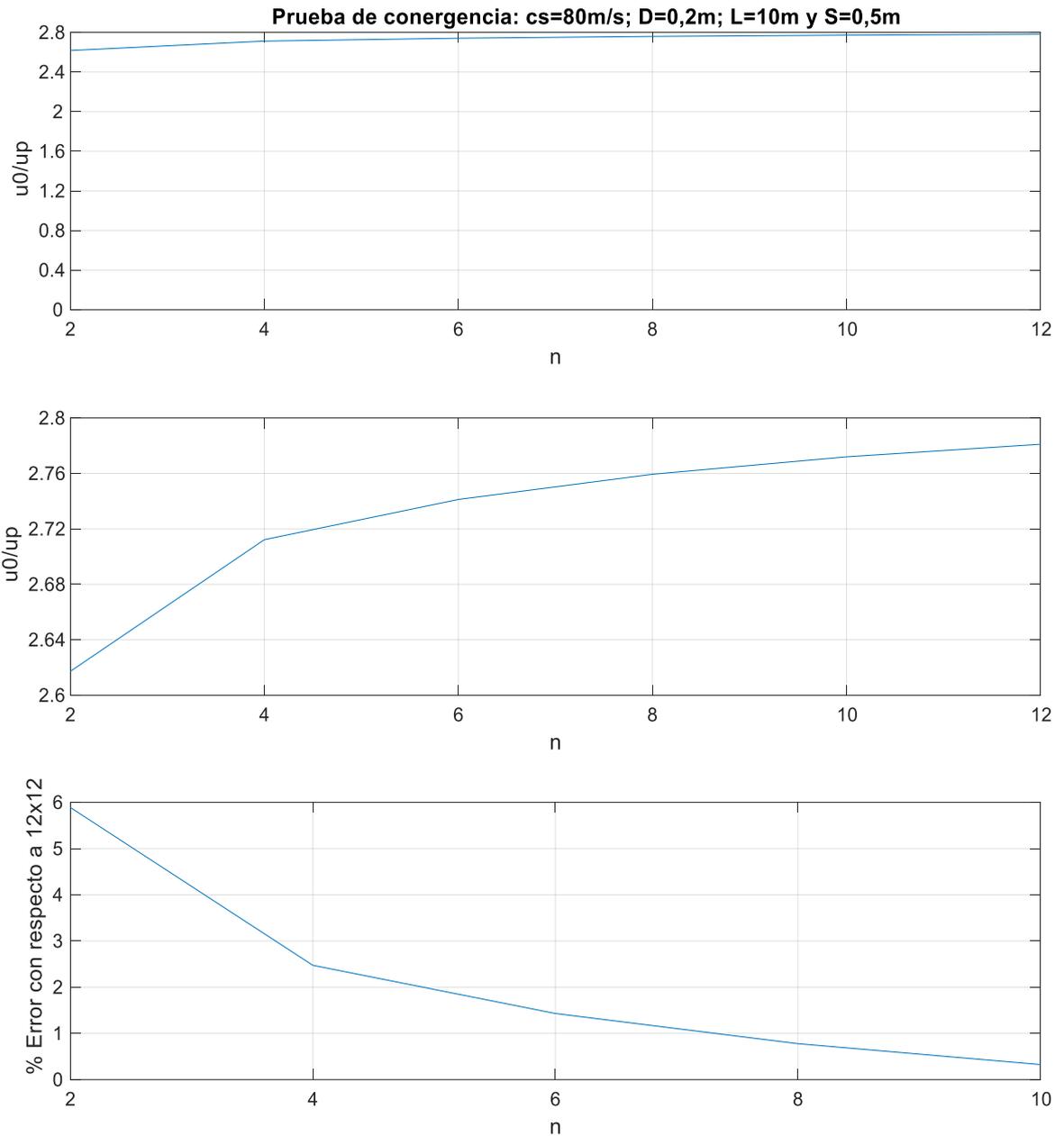


Ilustración 5. Gráficas obtenidas en la prueba inicial de convergencia

En la primera de las gráficas que se muestran en la Ilustración 5, se observa como las diferencias entre los ratios de desplazamientos obtenidos para las distintas configuraciones son bastante pequeñas.

En la segunda gráfica, se aprecia como las mayores diferencias entre los ratios de desplazamientos obtenidos se producen al cambiar de 2×2 a 4×4 . Para n mayores a 4, las pendientes de las distintas rectas, cada vez más se van haciendo más pequeñas.

En la tercera gráfica, se muestra el porcentaje de error con respecto a la configuración 12x12 de las distintas configuraciones, se observa como a partir de una configuración con 4x4 pilotes, los errores obtenidos son prácticamente insignificantes (menores al 3%).

La configuración escogida finalmente fue la correspondiente a $n=6$, aunque también habría sido válido escoger la correspondiente a $n=4$. Comparando el cociente de los desplazamientos para $n=12$ y $n=6$ con respecto al ratio obtenido para $n=6$, se obtiene un % de error aproximado de 1,50%. Por lo que se demuestra que estudiar la configuración 6x6 sería prácticamente similar a estudiar la configuración de 12x12.

1.6. Análisis de las gráficas obtenidas

Una vez definida la configuración con el número de pilotes que se estudiará (6x6) y todos los parámetros variables a analizar, se procederá a representar todos los resultados en gráficas que permitan entender de forma visual la influencia de los distintos parámetros (D , L , S y c_s), en la ganancia resistente del suelo, que se cuantifica con el ratio de desplazamientos u_0/u_p . Por último, se representarán dos nubes de puntos, una para el ratio V_h/A y otra nube de puntos para el ratio Coste por pilote/ A . En ambas nubes se mostrarán todos los casos estudiados, donde además de verse la influencia de todos los parámetros variables sobre la ganancia de resistencia del suelo, se ilustrará lo económico que resulta cada configuración estudiada.

A continuación, en los siguientes apartados, se muestran las representaciones obtenidas para cada parámetro a analizar. En todas las gráficas se representará la ganancia de rigidez del suelo en el eje de ordenadas y los distintos parámetros geométricos a estudiar (D , L y S) se dispondrán en el eje de abscisas, para así estudiar la influencia de estos sobre la rigidización del terreno. Cada representación está formada por 5 o 6 gráficas, donde cada una de ellas corresponde a los distintos valores de otro parámetro geométrico diferente al que se representa en el eje de abscisas. Además, cada gráfica contiene distintas curvas, cada una de estas hace referencia al otro parámetro geométrico que faltaría, de manera que la totalidad de los casos en cuanto a D , L y S estarían representados. Por último, aclarar que cada representación contiene a su vez tres hojas diferentes, donde cada hoja corresponde a un valor de c_s , de forma que con estas tres hojas se representarían todos los 435 casos que se definieron en los apartados anteriores. Aunque con una representación es suficiente para visualizar todos los casos, se mostrarán varias representaciones para comprender mejor la influencia de los distintos parámetros en la mejora del suelo.

La metodología empleada para nombrar a las distintas representaciones es la que procede: u_0/u_p vs Parámetro1-Parámetro2; donde Parámetro1 hace referencia al parámetro que se representará en el eje de abscisas y Parámetro2 hace referencia al parámetro usado para definir las distintas curvas de cada gráfica. A continuación, se procederá a mostrar todas las representaciones realizadas (de la Ilustración 7 a la Ilustración 17) y a comentarlas.

En cuanto a las nubes de puntos, el ratio de desplazamientos también se representará en el eje de ordenadas, mientras que en el eje de abscisas se mostrarán los valores de los ratios económicos: V_h/A (Ilustraciones 18, 19 y 20) y Coste por pilote/ A (Ilustraciones 21, 22 y 23), estos ratios están representados en escala logarítmica. Para distinguir todos los casos estudiados en las diferentes nubes de puntos, se escogió un color diferente para cada separación y un marcador diferente para cada valor de D (triángulo, estrella, círculo...). Por su parte, el valor de la longitud (L) será fácilmente identificable, pues a mayor longitud mayor será el volumen de hormigón y el coste de los pilotes, por lo que para un mismo color y marcador (misma S y D), a valores mayores de longitud más a la derecha quedarán los puntos. El objetivo de estas dos nubes de puntos, será buscar las soluciones no dominadas, o lo que es lo mismo, las que marcan el borde de soluciones que son óptimas (mayor u_0/u_p) para un coste determinado (V_h/A o Coste por pilote/ A).

1.6.1. Representaciones u_0/u_p vs D-S

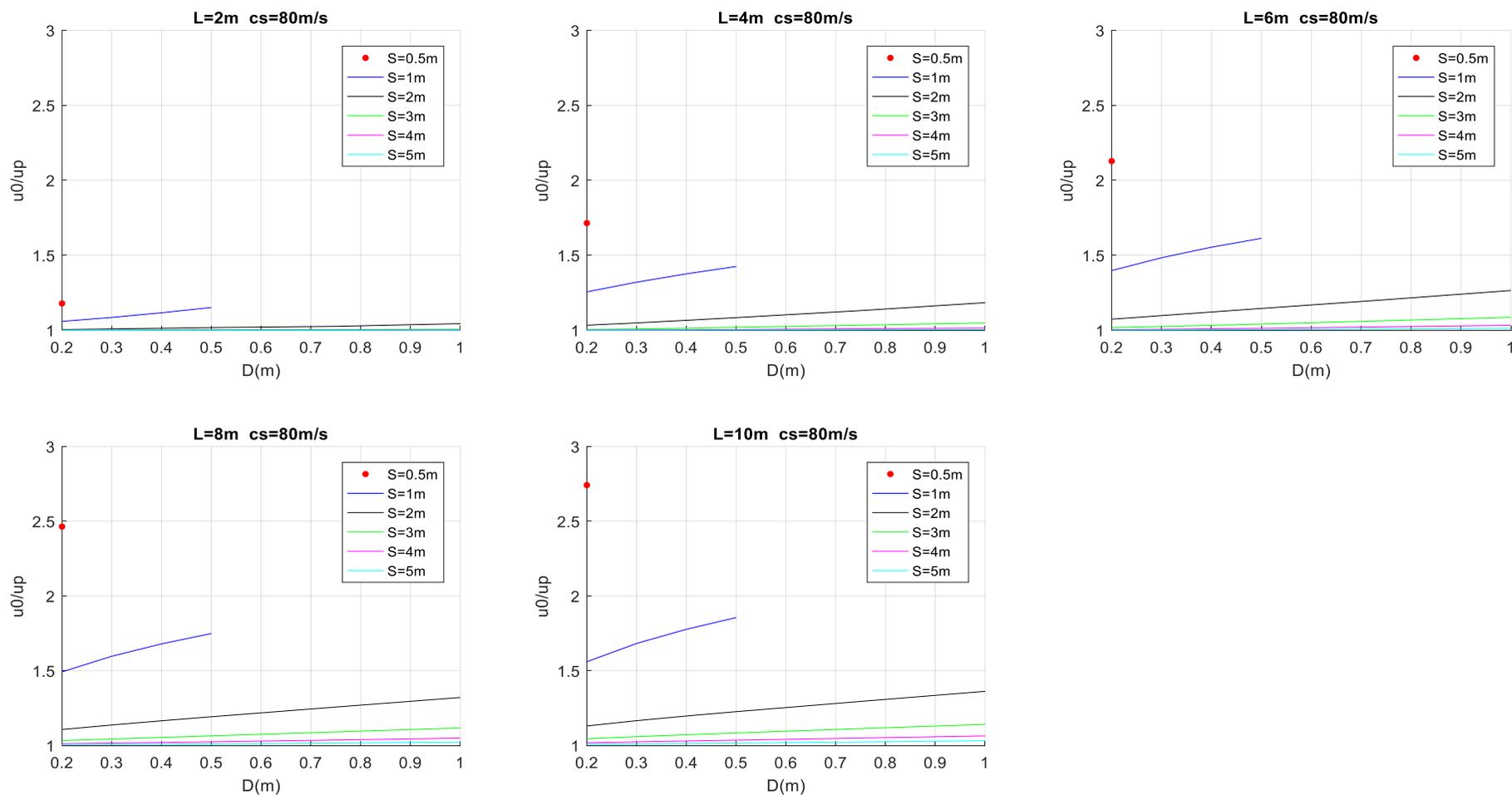


Ilustración 6. Representación u_0/u_p vs D-S, para $C_s=80$ m/s

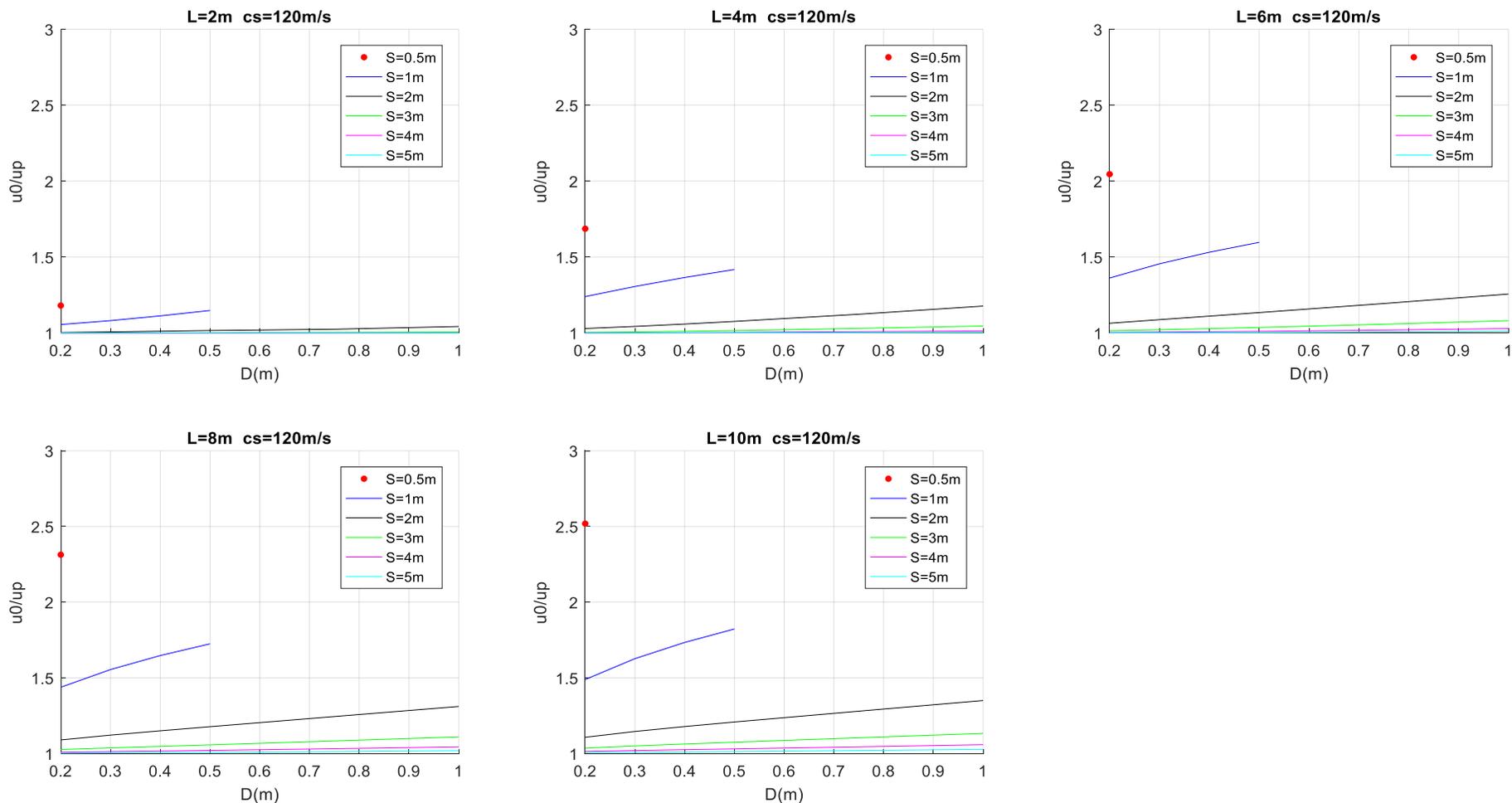


Ilustración 7. Representación u_0/up vs $D-S$, para $Cs=120 m/s$

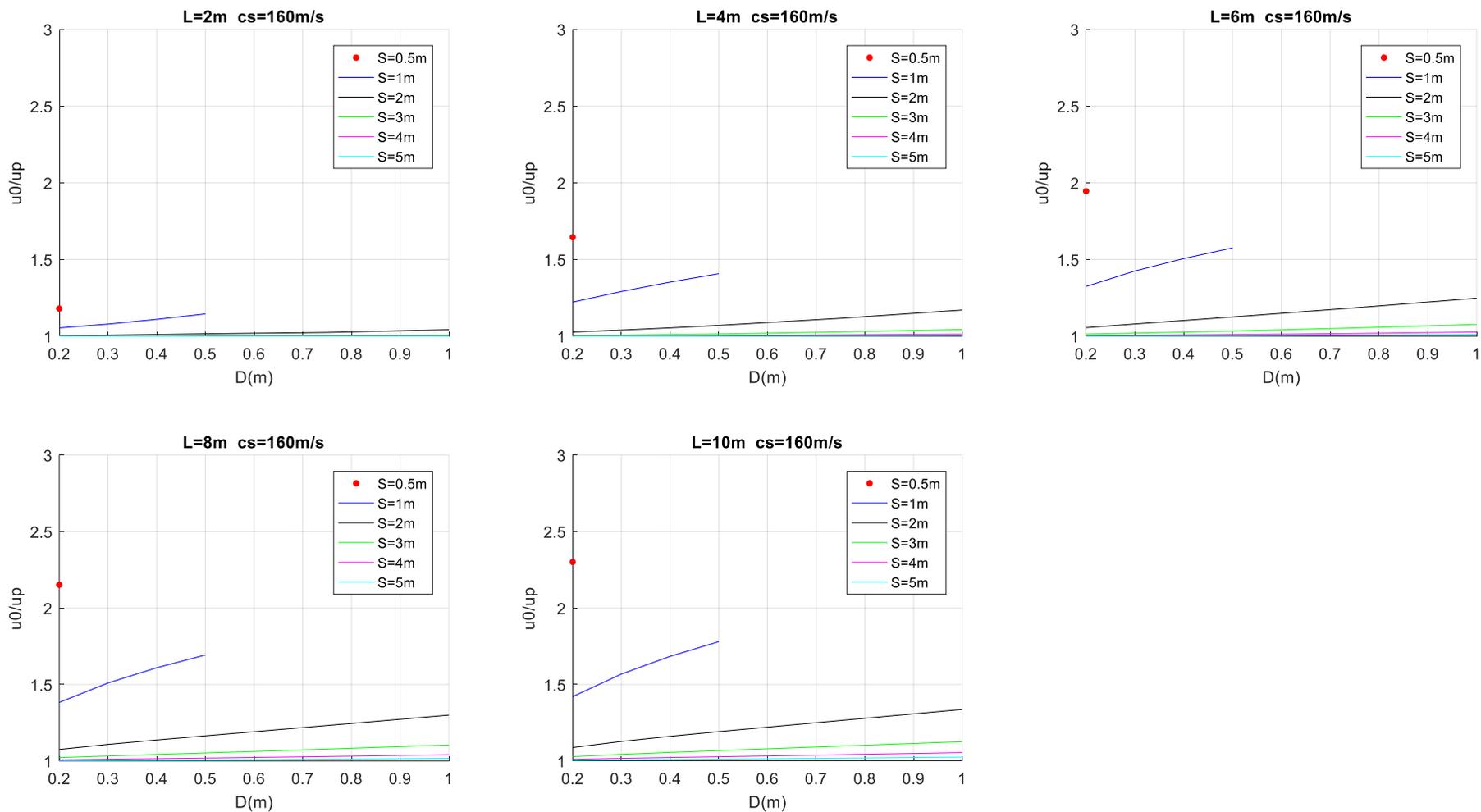


Ilustración 8. Representación u_0/u_p vs D - S , para $C_s=160$ m/s

1.6.2. Análisis de los resultados u_0/u_p vs D-S

En las Ilustraciones 6, 7 y 8, se puede apreciar claramente la influencia del diámetro de los pilotes sobre la ganancia de resistencia que adquiere el suelo. El ratio u_0/u_p sigue una variación prácticamente lineal con respecto al diámetro de los pilotes para cada separación y longitud. De esta manera, la rigidización del suelo sufre una variación progresiva a medida que los diámetros aumentan, de forma que cada curva de la representación se puede considerar como una recta. Sí es cierto que a medida que aumenta el diámetro, se ve que la pendiente de las rectas disminuye un poco, pero es tan poco que resulta despreciable.

Además, se observa como al aumentar la separación entre los pilotes, la pendiente de la recta que relaciona el ratio de desplazamientos con el diámetro de los pilotes, tiende a hacerse cada vez menor. Por tanto, a mayor separación entre pilotes más insignificante resulta aumentar el diámetro. Así, para las mayores separaciones ($S > 3$ m) apenas se rigidiza el suelo al incrementar el diámetro.

Por otra parte, la influencia del diámetro es mayor cuanto mayor se va haciendo la longitud de los pilotes, solo hay que observar la primera gráfica (la correspondiente a $L=2$ m de las Ilustraciones 6, 7 y 8) y compararla con la última gráfica (la correspondiente con $L=10$ m de las Ilustraciones 6, 7 y 8) para apreciar este hecho. Con longitudes de 2 metros, resulta menos relevante aumentar el diámetro de los pilotes, sin embargo, a medida que va aumentando la longitud, se observa como la pendiente de las rectas va incrementando.

Por otro lado, al incrementar la dureza del terreno (aumento de la c_s), se aprecia que las pendientes de las distintas rectas no varían, solo varía el punto de intercepción de las rectas con el eje de ordenadas, que se ve desplazado hacia abajo, lo que hace que se obtengan ratios de desplazamientos menores, sin que se vea afectada la influencia que tiene la variación del diámetro sobre la rigidización del terreno. Comparando las Ilustraciones 6 ($c_s=80$ m/s) y 8 ($c_s=160$ m/s) entre sí, se observa que el cambio de dureza del suelo no afecta en gran medida a las rigidizaciones obtenidas para los distintos diámetros. El ratio u_0/u_p se ve reducido solamente en un valor comprendido en el intervalo $[0,15, 0,20]$, al pasar de un suelo blando ($c_s=80$ m/s) a un terreno más compacto ($c_s=160$ m/s).

1.6.3. Representaciones u_0/u_p vs L-D

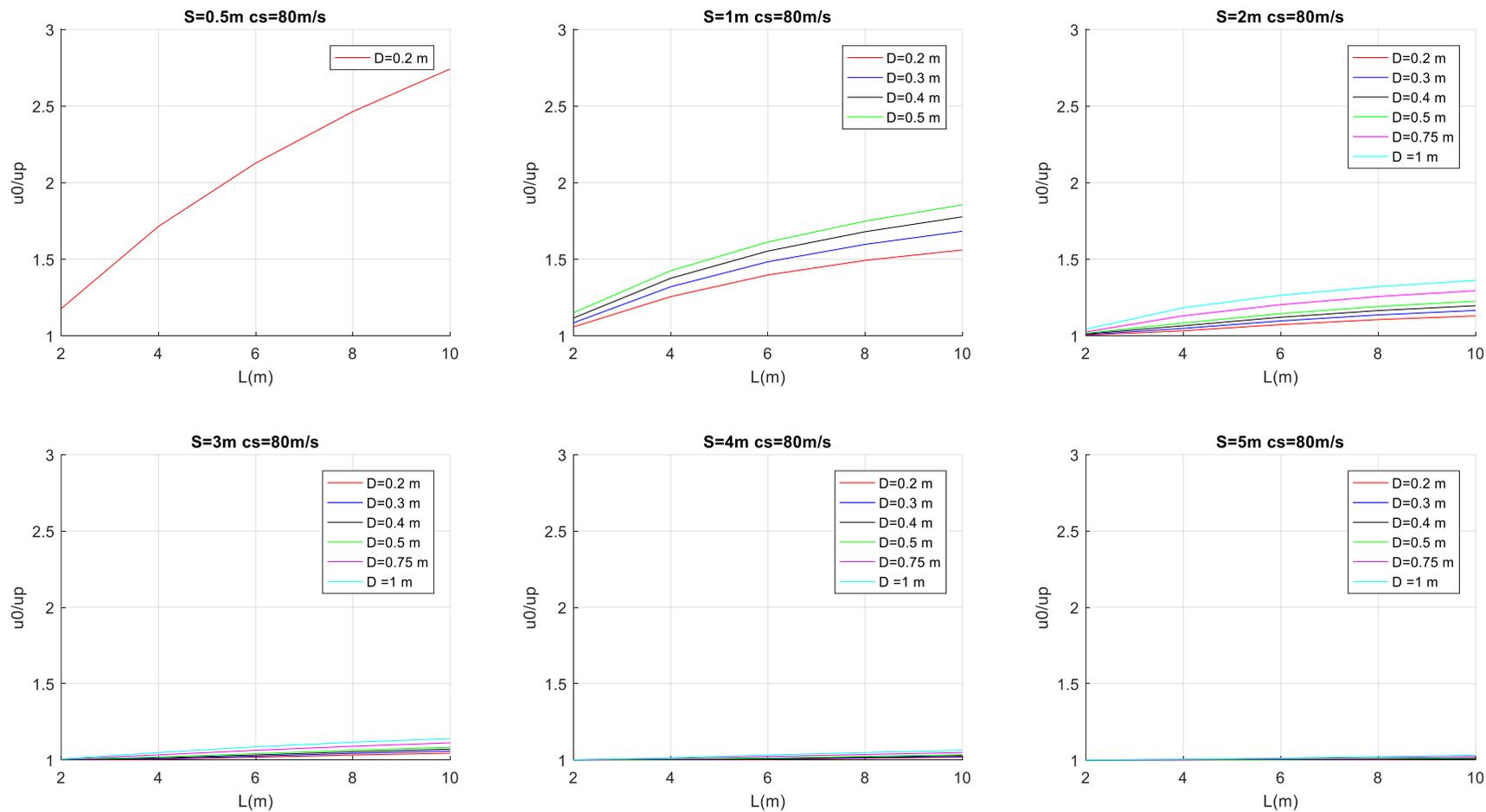


Ilustración 9. Representación u_0/u_p vs L-D, para $C_s=80 m/s$

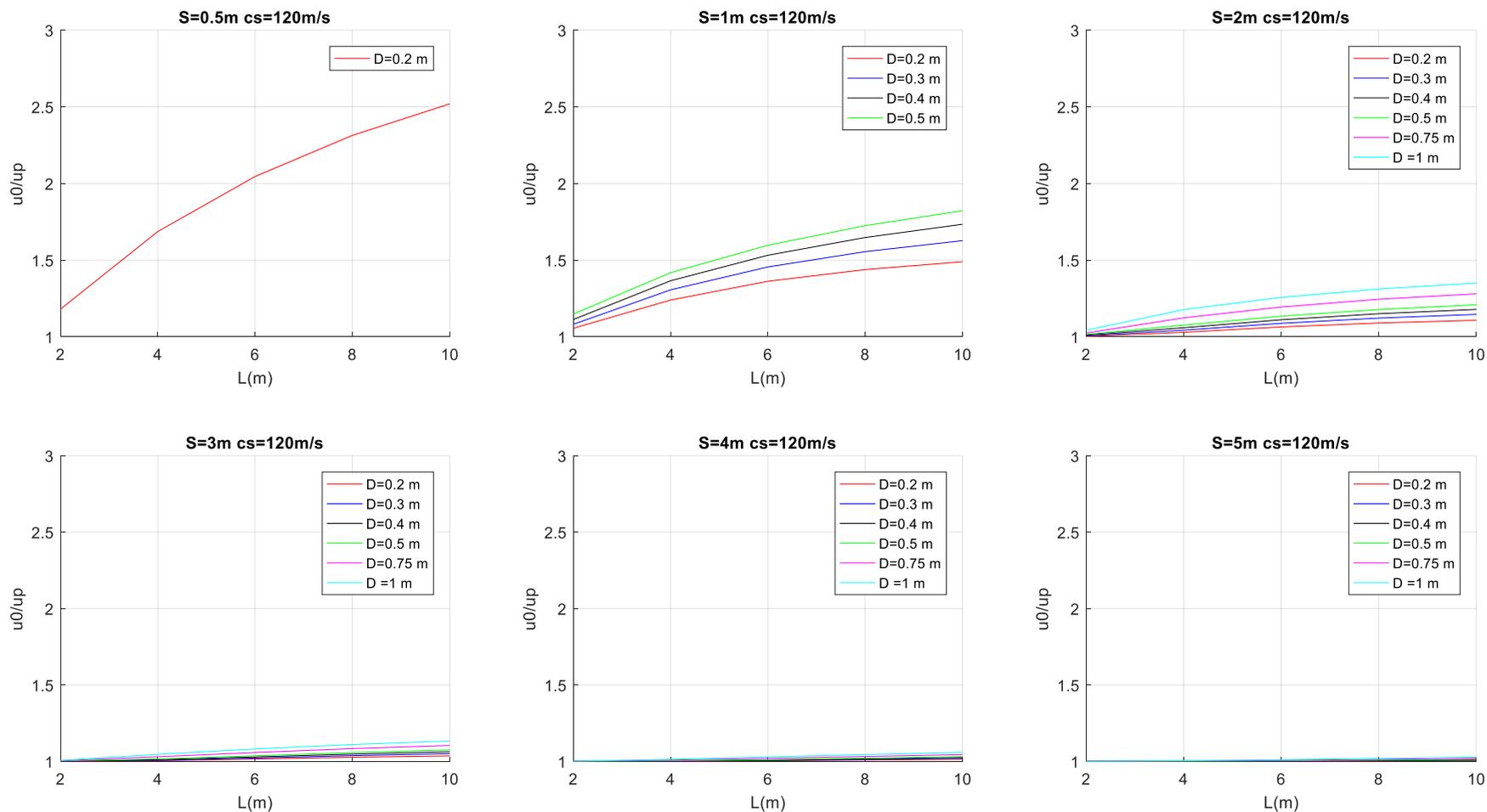


Ilustración 10. Representación u_0/u_p vs $L-D$, para $C_s=120\text{m/s}$

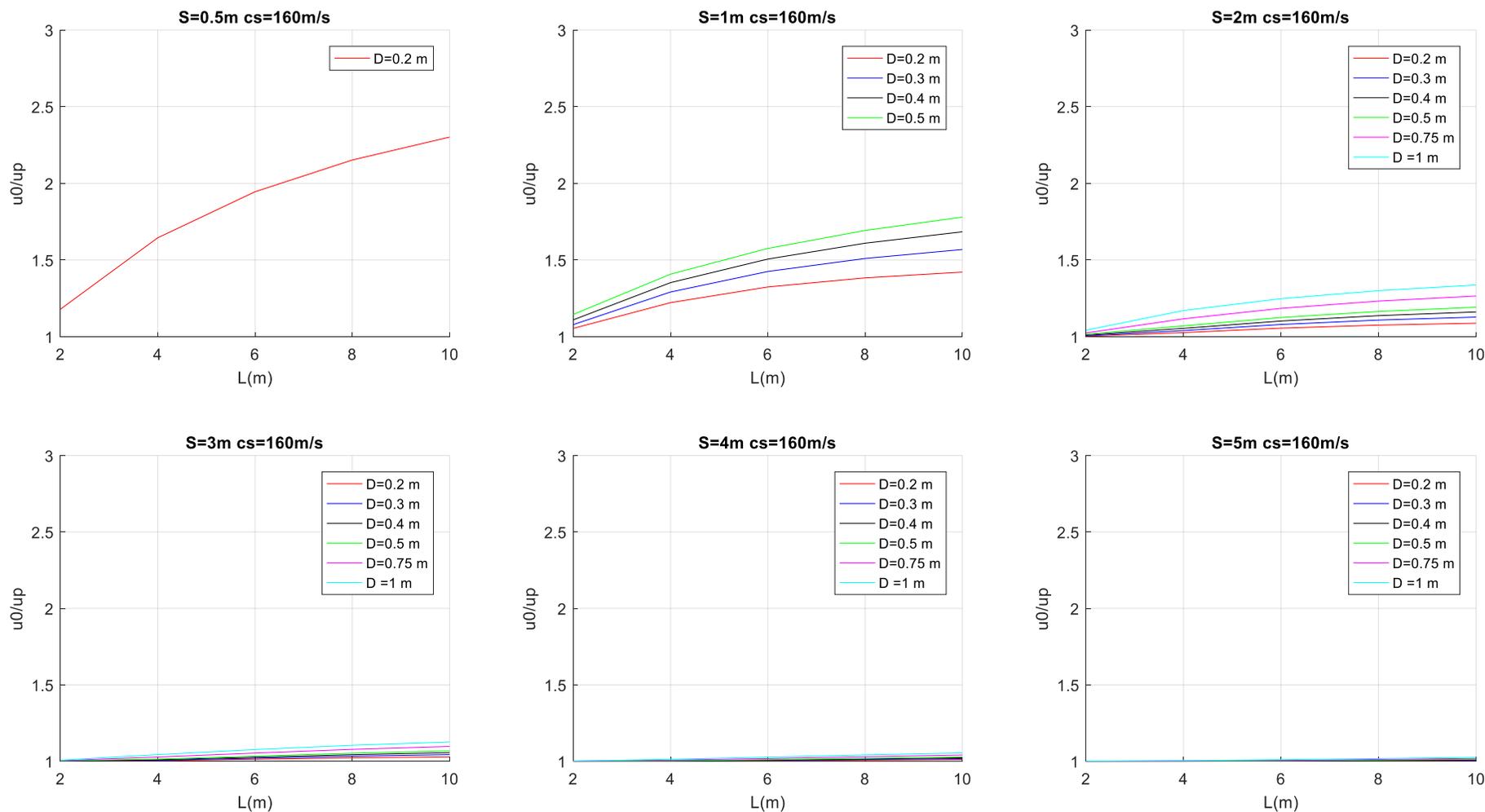


Ilustración 11. Representación u_0/u_p vs $L-D$, para $C_s=160 \text{ m/s}$

1.6.4. Análisis de los resultados u_0/u_p vs L-D

Atendiendo a las Ilustraciones 9, 10 y 11, aquí la variación que sufre el ratio de desplazamientos con respecto a la longitud de los pilotes, no es tan constante como lo fue con el diámetro, se observa que a medida que se va aumentando la longitud de los pilotes, cada vez más la rigidización del suelo tiende a hacerse constante. A diferencia del diámetro, que provoca una variación prácticamente lineal en el cociente u_0/u_p , la longitud tiene un comportamiento asintótico convexo sobre el ratio de desplazamientos (crece al incrementar la longitud, pero a grandes longitudes el crecimiento del ratio es menor, lo que hace que el efecto que tiene el incremento de longitud sobre la rigidización del suelo es menos importante).

Además, se observa también lo ya explicado en el apartado anterior, a medida que se va aumentando la longitud, las distintas curvas tienden a separarse más entre sí, por tanto, a mayores longitudes, se incrementa la influencia del diámetro sobre la rigidización que se obtiene.

Todo esto, hace que el aumentar la longitud de los pilotes presente una influencia considerable sobre los ratios de desplazamientos que se obtienen en el terreno hasta una cierta longitud. Esta longitud corresponde a 8 m, donde ya parece más significativo aumentar el diámetro, que seguir aumentando la longitud de los pilotes para mejorar la rigidización del suelo.

Por otra parte, cuando se va aumentando el espacio entre pilotes, el cambiar la longitud de los mismos va resultando cada vez menos importante, al igual que pasaba con los diámetros.

Por último, se aprecia que al volverse el terreno más compacto y duro, es decir, al incrementar c_s , disminuye ligeramente la influencia que tiene el cambio de la longitud sobre la rigidización del suelo (la asíntota tiende a caerse a medida que se aumenta la longitud), provocando que los ratios de desplazamientos obtenidos para longitudes grandes ($L > 6$ m) y separaciones pequeñas ($S < 2$ m), disminuyan ligeramente (comparar Ilustraciones 9, 10 y 11 entre sí).

1.6.5. Representaciones u_0/u_p vs L-S

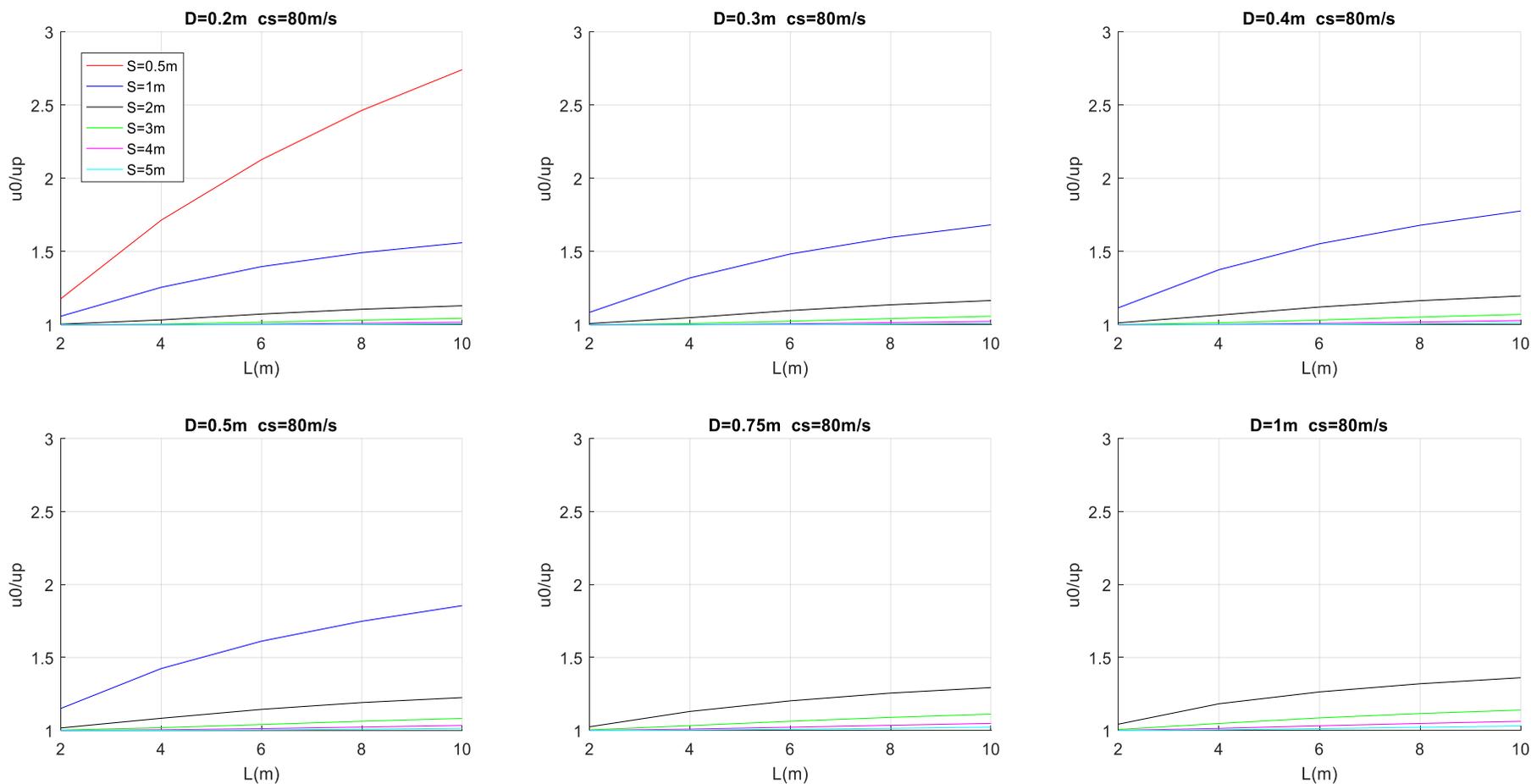


Ilustración 12. Representación u_0/u_p vs L-S, para $C_s=80\text{ m/s}$

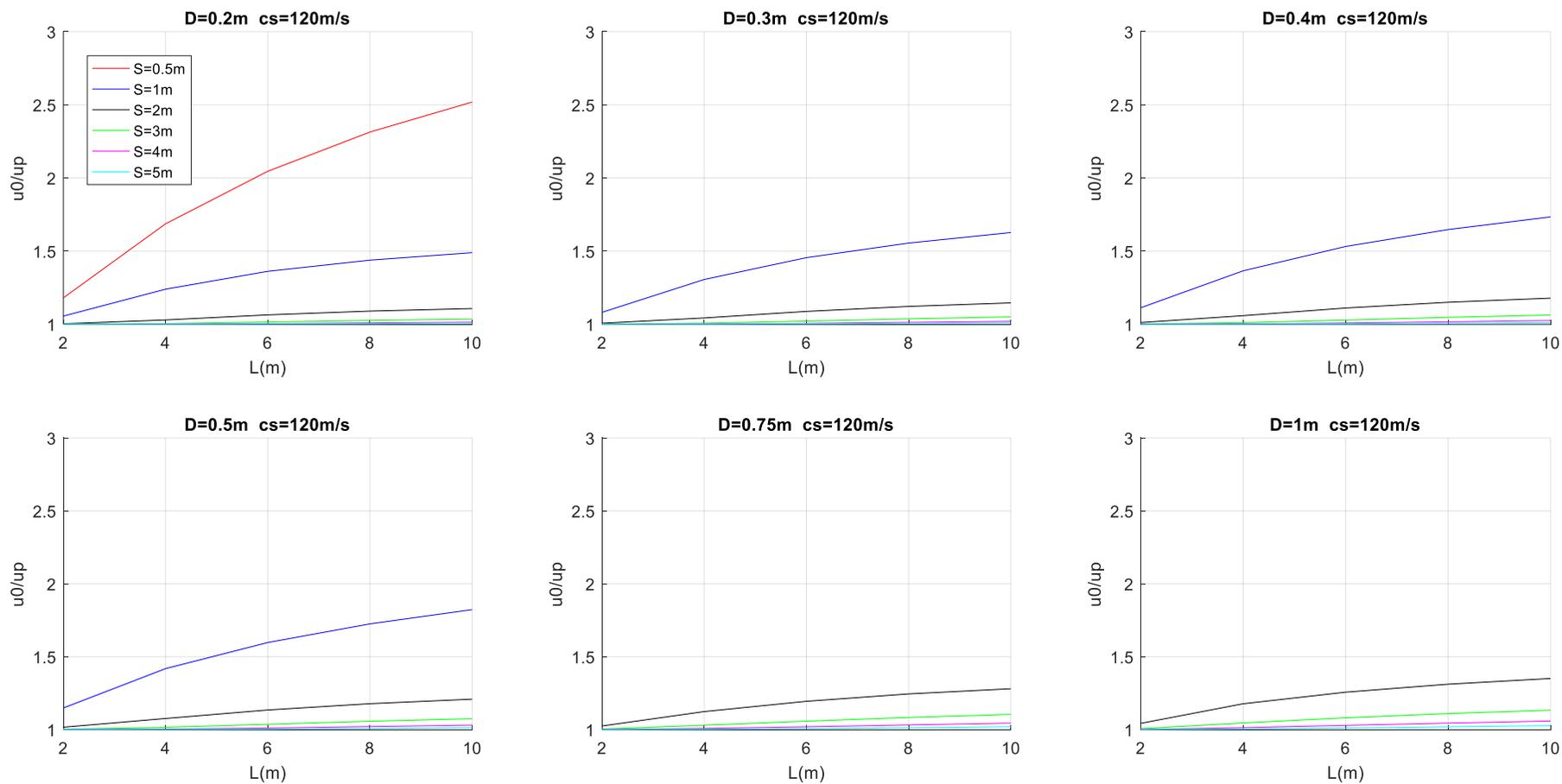


Ilustración 13. Representación u_0/u_p vs L - S , para $C_s=120$ m/s

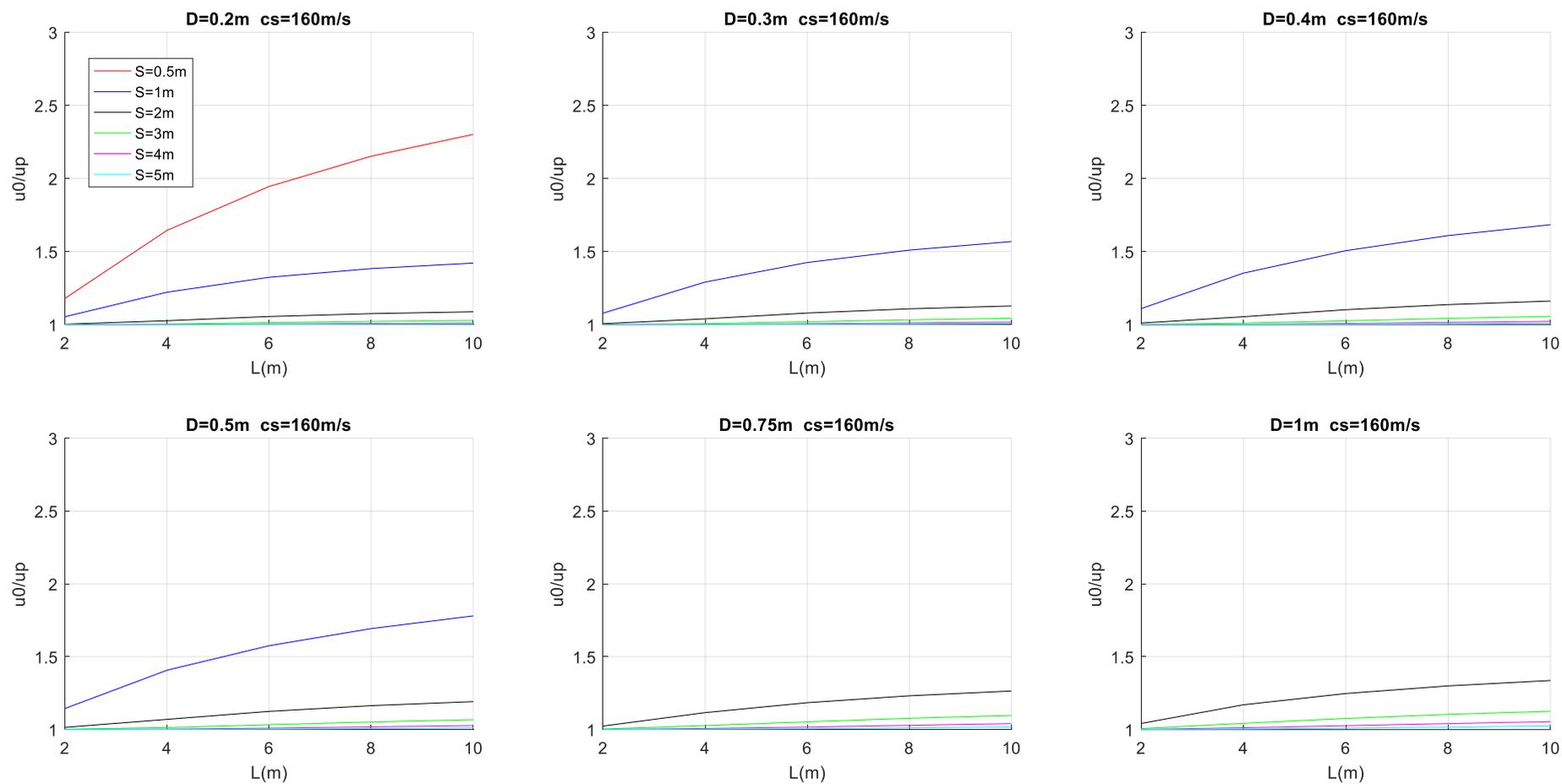


Ilustración 14. Representación u_0/u_p vs L - S , para $C_s=160 \text{ m/s}$

1.6.6. Análisis de los resultados u_0/u_p vs L-S

En las Ilustraciones 12, 13 y 14 se observa exactamente lo mismo que en las Ilustraciones 9, 10 y 11. Se muestra, una vez más, la influencia asintótica que tiene la longitud con respecto al ratio de desplazamientos. Asimismo, se manifiesta que los incrementos de la longitud, poseen una gran repercusión en la ganancia de rigidez del suelo, para las separaciones entre pilotes más pequeñas ($S < 2$ m).

También, como ya se mencionó con anterioridad, a medida que se aumenta el diámetro, los valores del ratio de desplazamientos de las longitudes más grandes son los que más crecen, de manera que la influencia del diámetro sobre la rigidización del suelo es mayor cuanto mayor es la longitud del pilote.

En estas representaciones (Ilustraciones 12, 13 y 14) queda de manifiesto que, el parámetro con más influencia en la rigidización del suelo es sin duda la separación entre pilotes. A menores separaciones se logra rigidizar más que aumentando la longitud o el diámetro de los pilotes.

Al cambiar el perfil geotécnico del suelo, al volverse más duro, las rigidizaciones que más se ven afectadas son las correspondientes a las longitudes mayores ($L > 6$ m) y separaciones pequeñas ($S < 2$ m), las demás configuraciones apenas se ven alteradas al cambiar la dureza del terreno.

1.6.7. Representaciones u_0/u_p vs S-D

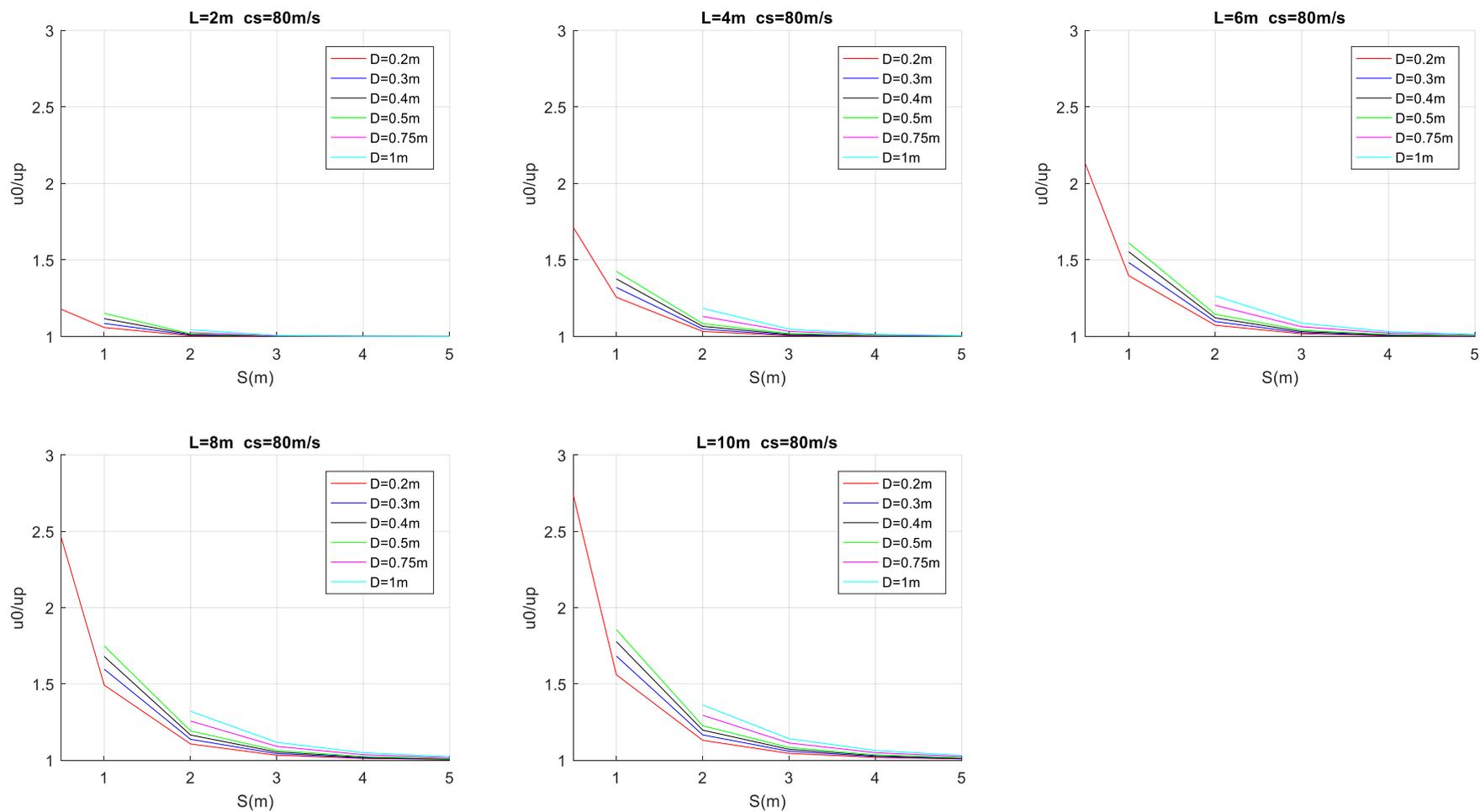


Ilustración 15. Representación u_0/u_p vs S-D, para $C_s=80 \text{ m/s}$

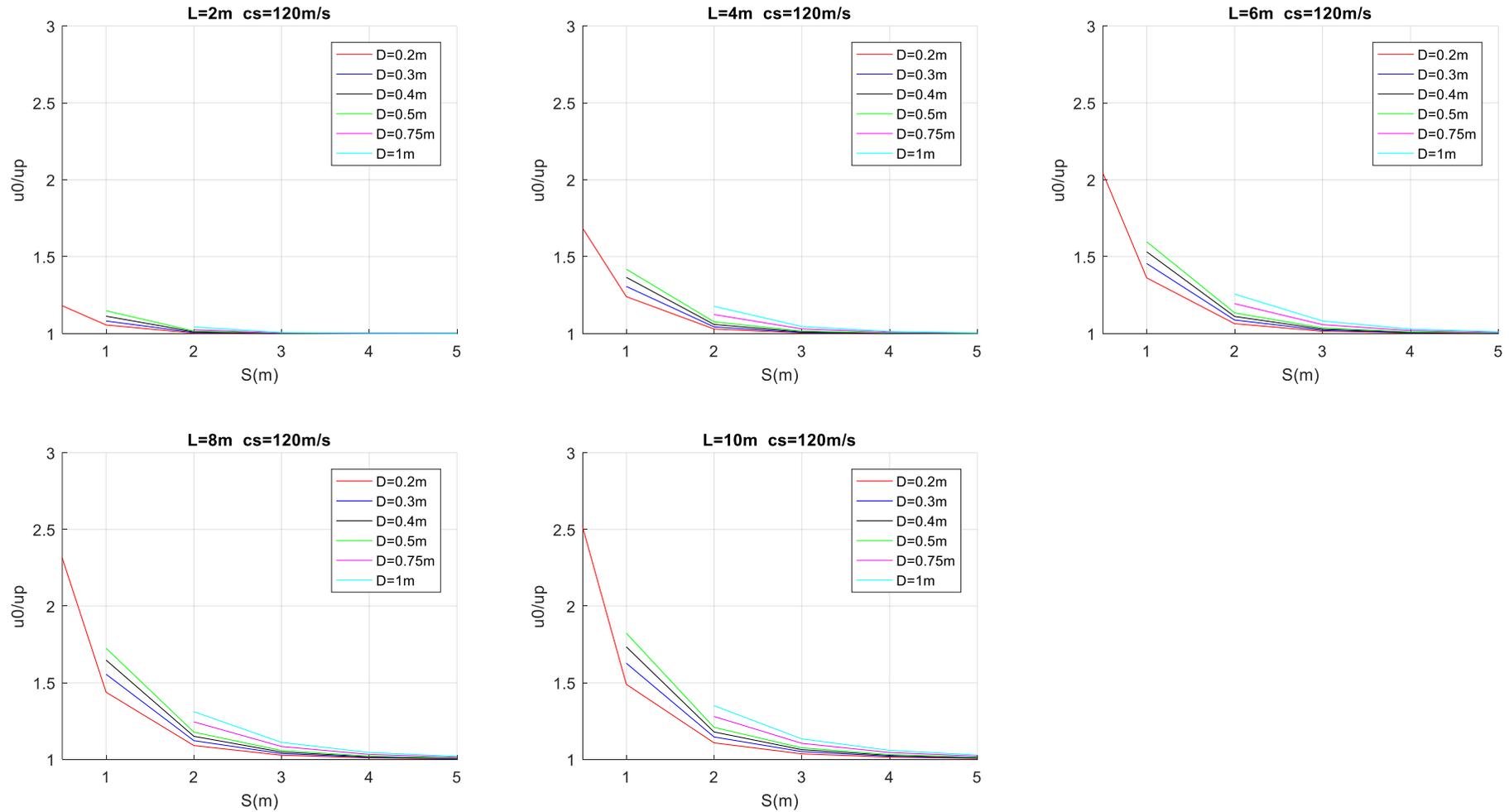


Ilustración 16. Representación u_0/u_p vs $S-D$, para $C_s=120 \text{ m/s}$

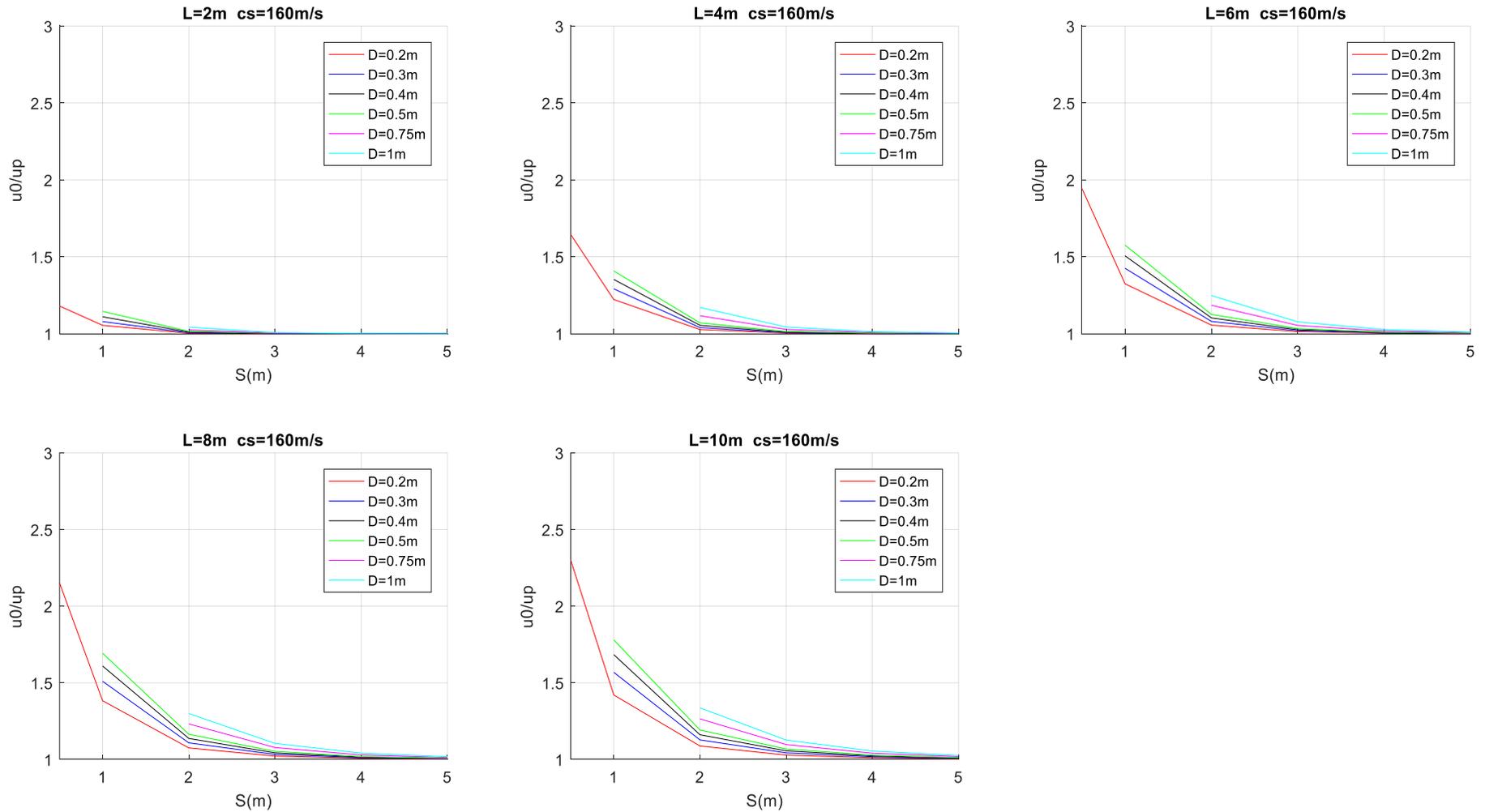


Ilustración 17. Representación u_0/u_p vs S - D , para $C_s=160$ m/s

1.6.8. Análisis de los resultados u_0/u_p vs S-D

La influencia de la separación sobre el ratio de desplazamientos, toma una forma asintótica cóncava (Ilustraciones 15, 16 y 17), a diferencia de la longitud de los pilotes, que mostraba una forma asintótica pero convexa. De esta forma, las menores separaciones dan mayores rigidizaciones, mientras que separaciones muy grandes dan rigidizaciones prácticamente nulas. En estas representaciones, también se observa la gran influencia que tiene la separación entre pilotes en la ganancia de resistencia del terreno.

Además, también se verifica que, en un principio, el cambiar de longitud supone una mayor influencia en la rigidización del terreno que incrementar el diámetro de los pilotes. Sin embargo, para una longitud relativamente grande ($L > 6$ m), la influencia que tiene el aumentar el diámetro y la longitud sobre el ratio de desplazamientos es muy parecida.

Por otra parte, destacar que la influencia de la longitud en la rigidización del terreno para separaciones pequeñas es bastante considerable. Las pequeñas separaciones son las que más rigidizan el suelo, pero si la longitud de los pilotes es pequeña, se rigidiza bastante poco en comparación a si la longitud de los pilotes toma valores grandes. Esto se puede apreciar comparando los ratios obtenidos en la gráfica correspondiente a $L=2$ m, con los obtenidos en la gráfica correspondiente a $L=10$ m, para separaciones pequeñas ($S < 2$ m), en las Ilustraciones 15, 16 y 17. Así, se verifica que la separación entre pilotes tiene una gran repercusión en la ganancia resistente del suelo, pero esta ganancia está totalmente relacionada con la longitud de los pilotes, pues poco se rigidiza para pilotes dispuestos muy juntos entre sí, si estos no poseen una longitud considerable.

Con el cambio de dureza del terreno, los ratios de desplazamientos más afectados son los que se obtienen para las separaciones pequeñas ($S \leq 2$ m) y longitudes grandes ($L \geq 6$ m), es decir, donde se obtienen mayores valores en la ganancia de rigidez del suelo. A medida que incrementa la separación entre pilotes o a medida que disminuye la longitud de los mismos, la influencia de cambiar de terreno es cada vez menor sobre el ratio de desplazamientos.

1.6.9. Nube de puntos u_0/u_p vs V_h/A

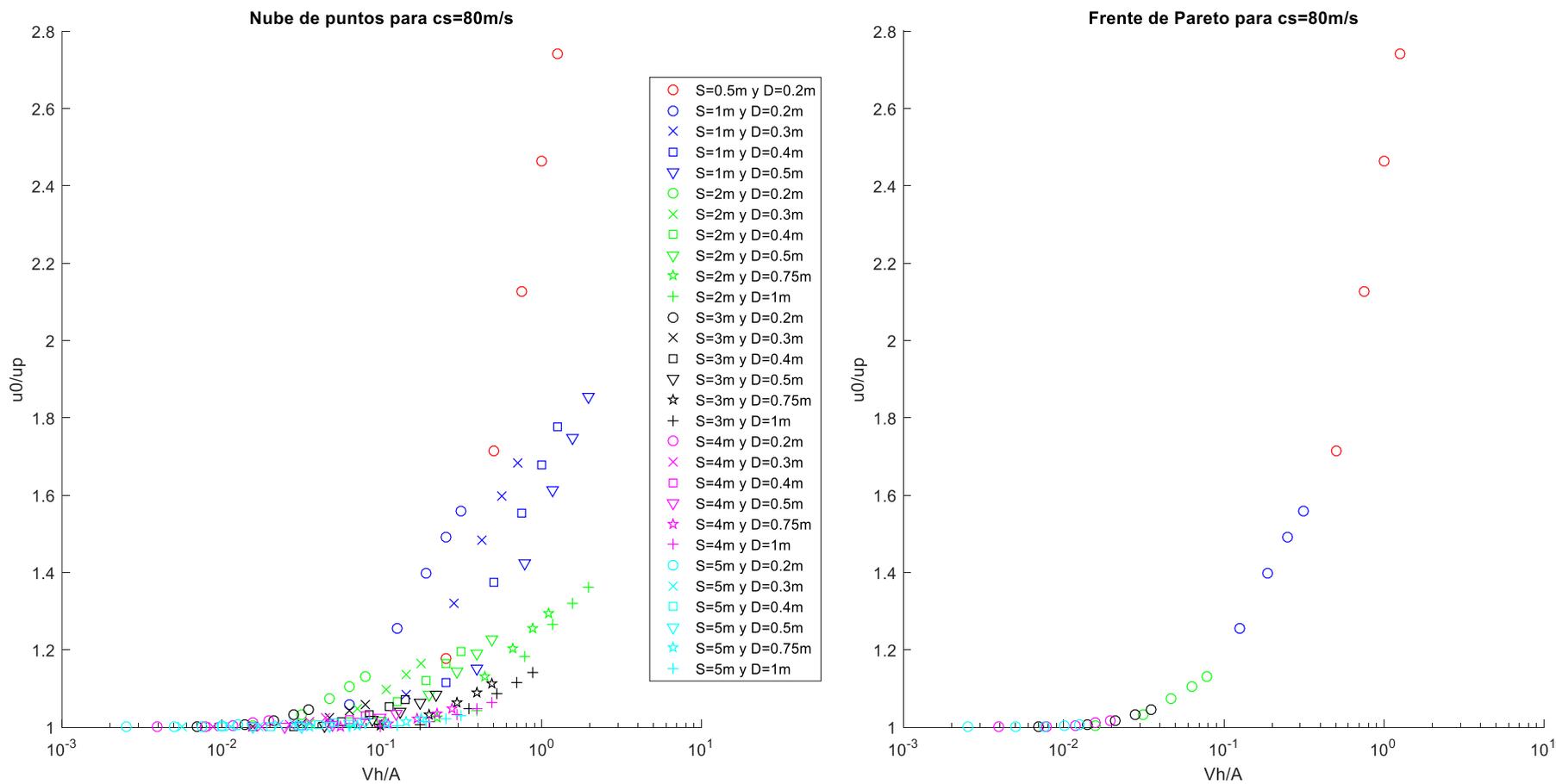


Ilustración 18. Representación u_0/u_p vs V_h/A , para $C_s=80\text{ m/s}$.

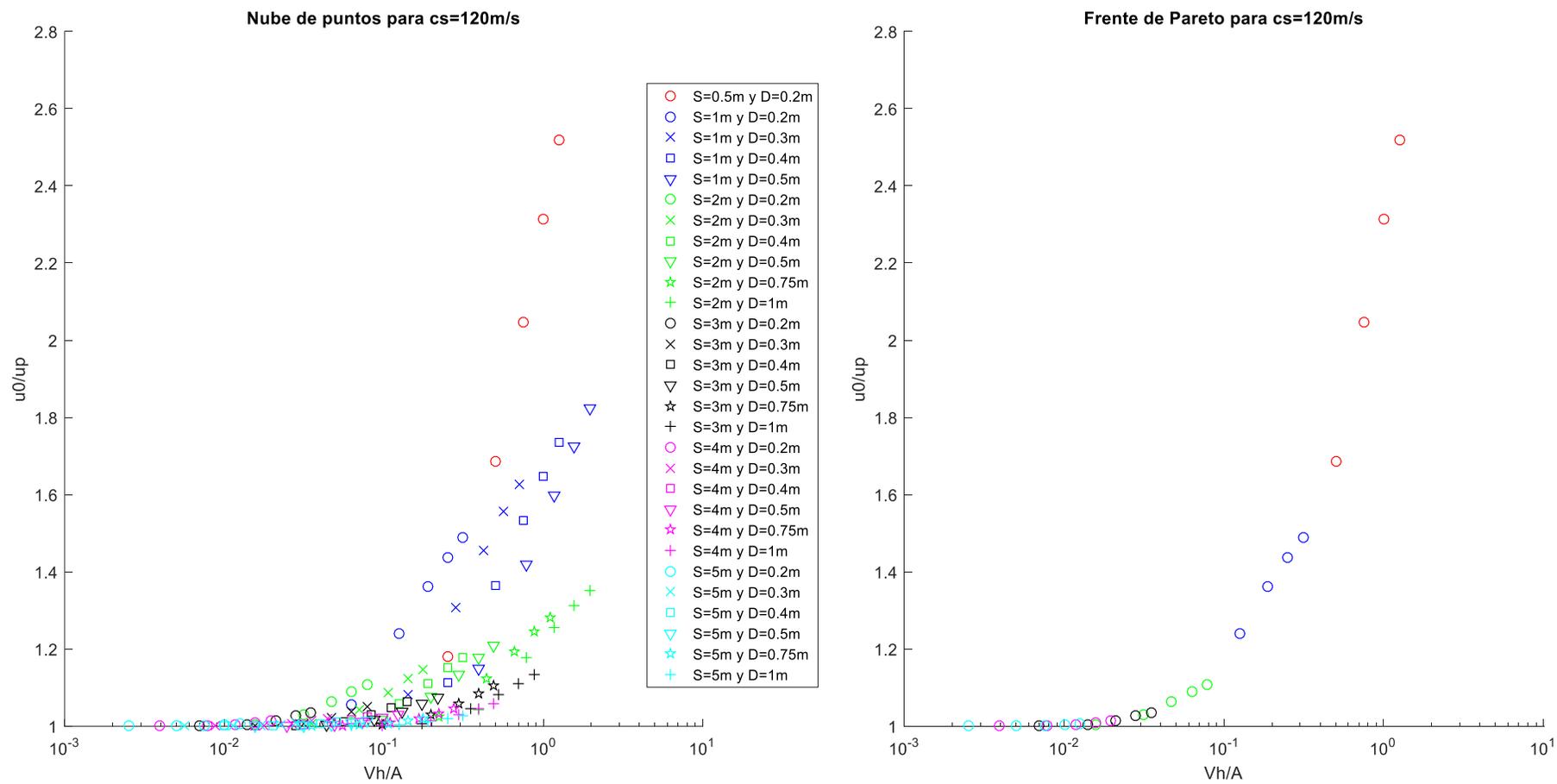


Ilustración 19. Representación $u0/up$ vs Vh/A , para $Cs=120 m/s$

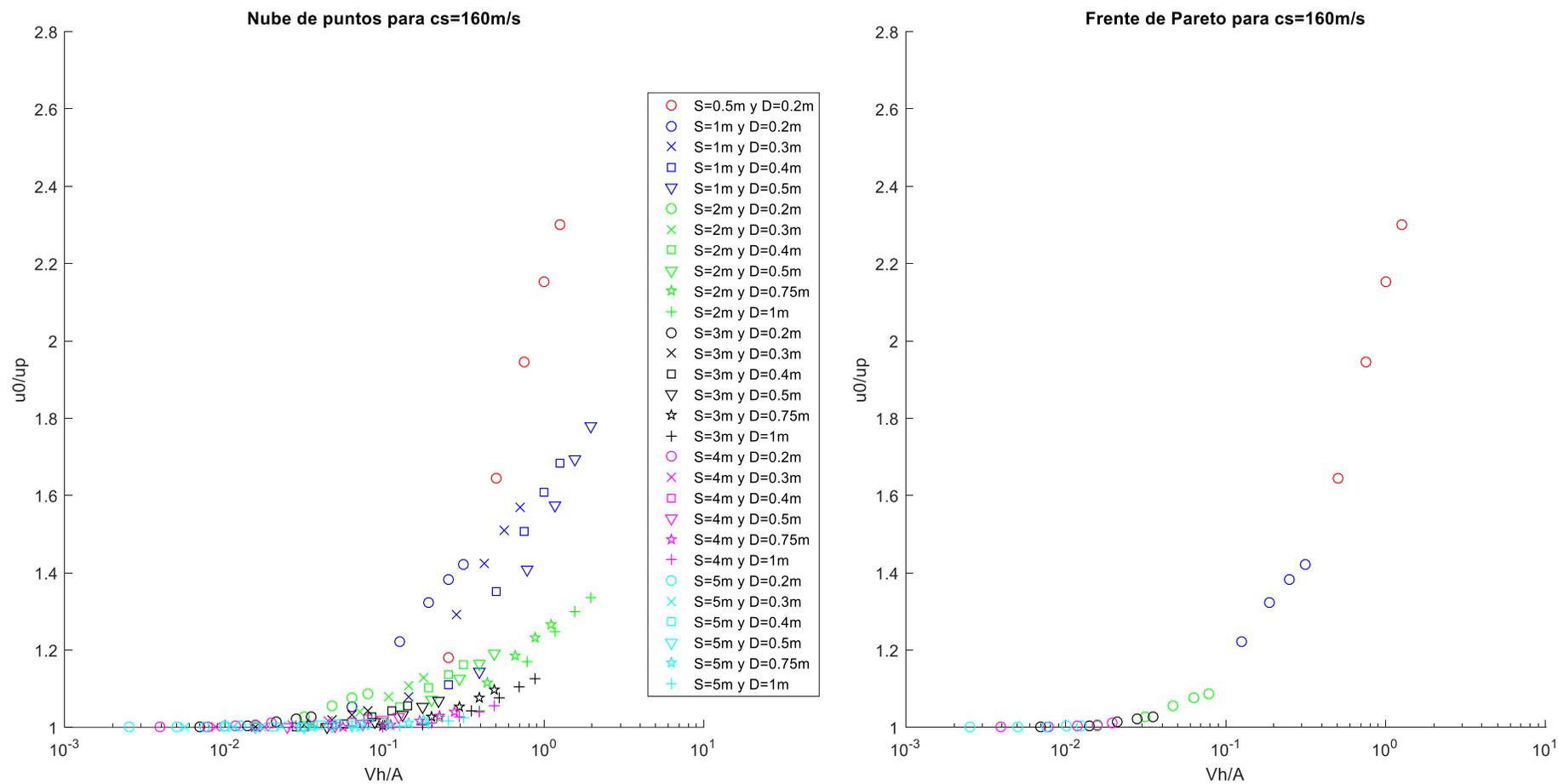


Ilustración 20. Representación u_0/u_p vs Vh/A , para $C_s=160\text{ m/s}$

1.6.10. Nube de puntos u_0/u_p vs Coste por pilote/A

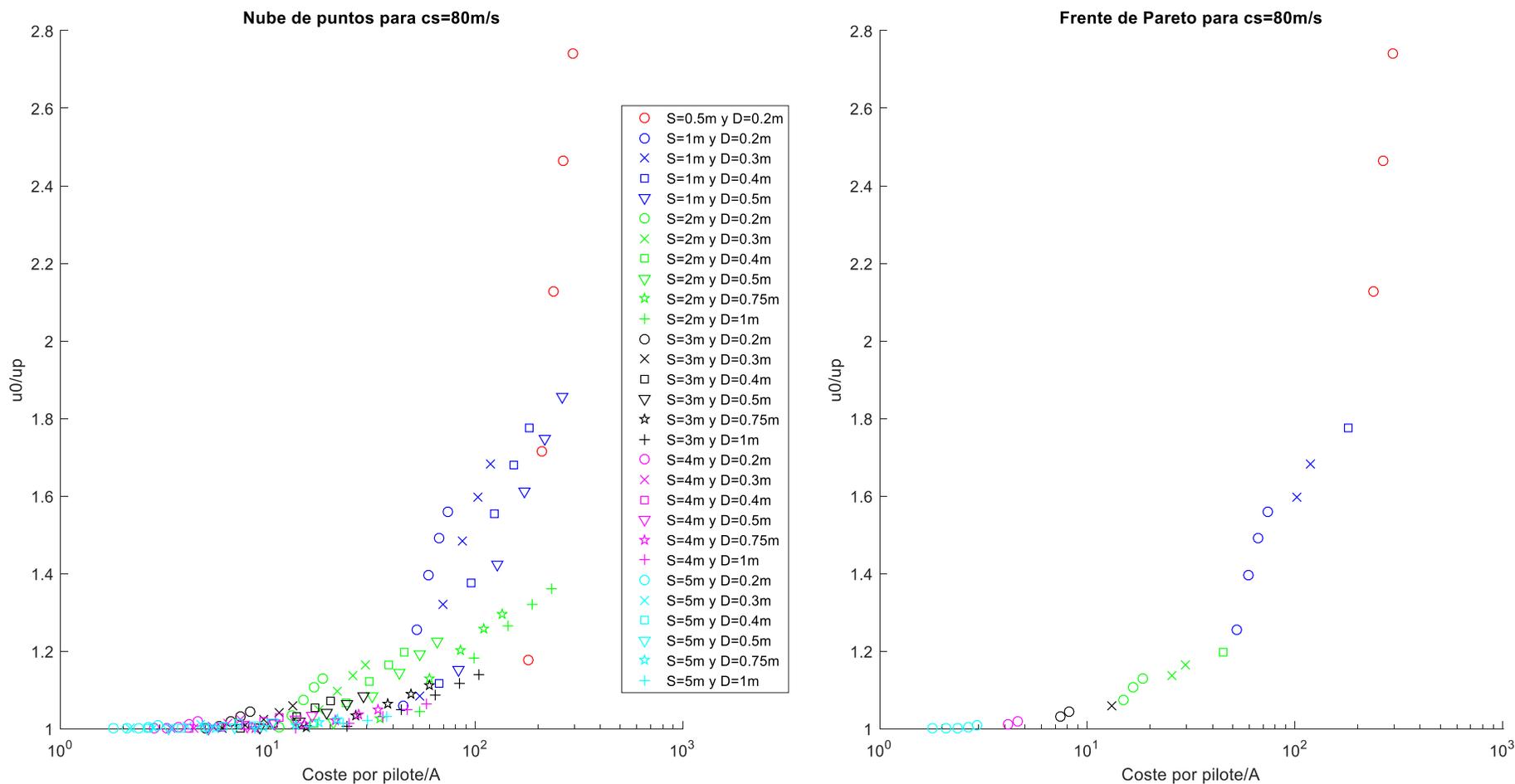


Ilustración 21. Representación u_0/u_p vs Coste por pilote/A, para $C_s=80\text{ m/s}$

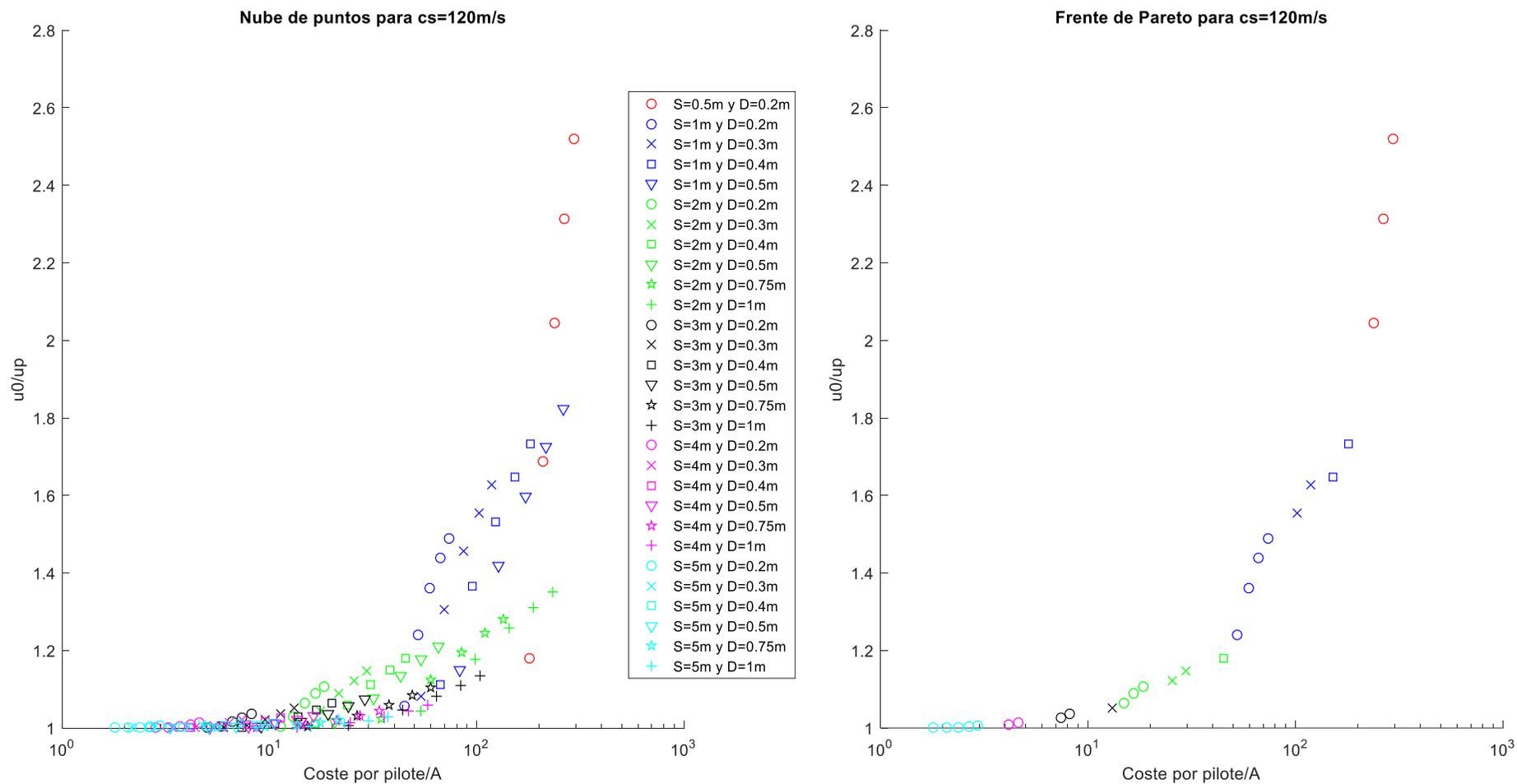


Ilustración 22. Representación $u0/up$ vs Coste por pilote/A, para $Cs=120 m/s$

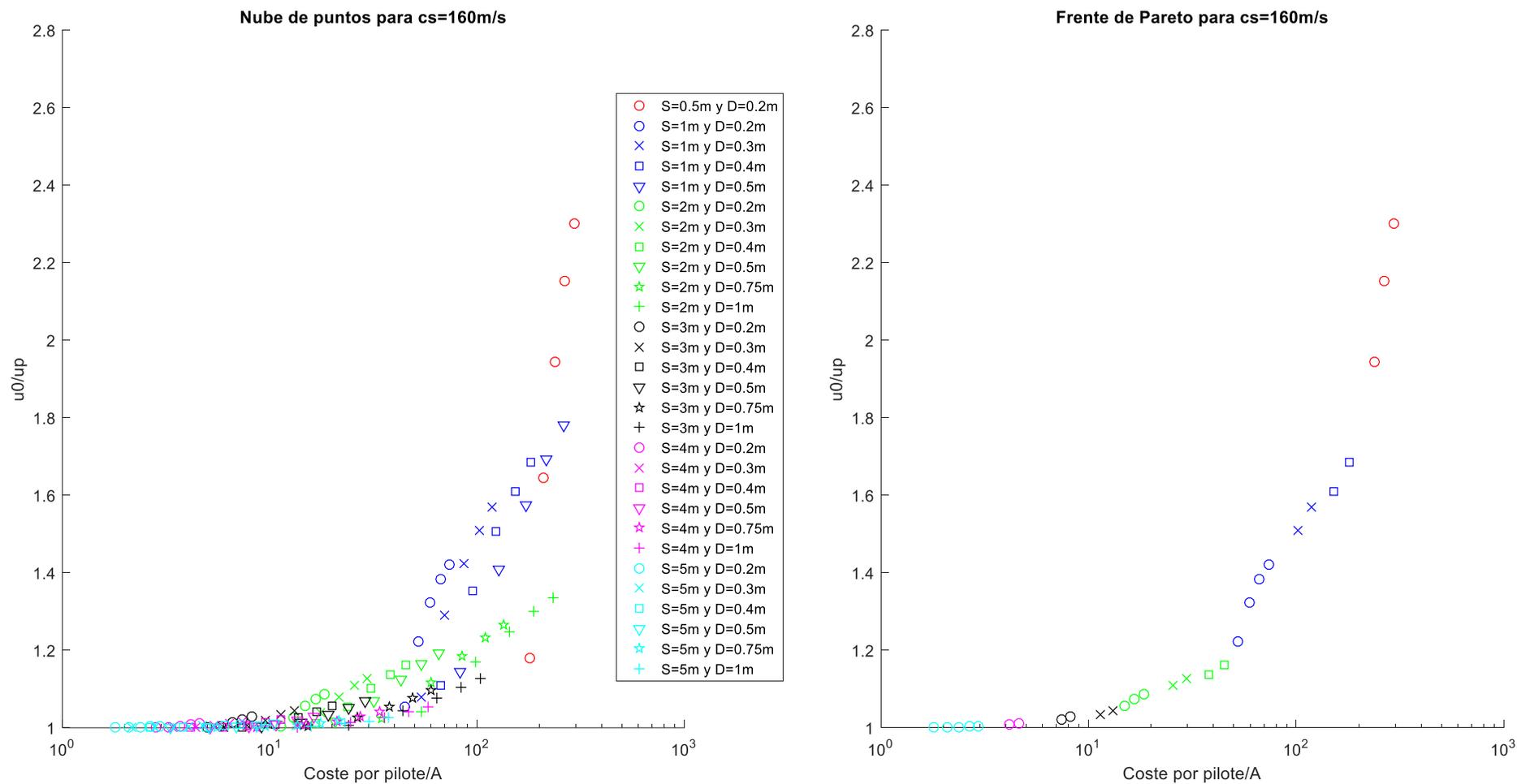


Ilustración 23. Representación u_0/u_p vs Coste por pilote/A, para $C_s=160\text{ m/s}$

1.6.11. Análisis de los resultados para las nubes de puntos u_0/u_p vs Vh/A y u_0/u_p vs Coste por pilote/A

El principal objetivo en estas dos nubes de puntos es identificar los casos (puntos) que constituyen la llamada Frontera de Pareto, es decir, buscar visualmente las soluciones más económicas (soluciones no dominadas) para los distintos niveles de rigidización que se obtuvieron.

Las nubes de puntos correspondientes a u_0/u_p vs Vh/A (Ilustraciones 18, 19 y 20), presentan un problema, y es que todas las soluciones no dominadas corresponden al menor diámetro ($D=0,2$ m). Esto tiene como explicación la influencia que tiene el diámetro sobre el volumen, que al encontrarse al cuadrado supone que el volumen dependa bastante más de este parámetro. De forma que la influencia que tiene el diámetro (D) sobre el volumen de hormigón, es mayor que la ganancia de resistencia del terreno que se produce al aumentar D o L para cada configuración con la misma separación entre pilotes.

Sin embargo, en la nube de puntos perteneciente a u_0/u_p vs Coste por pilote/A (Ilustraciones 21, 22 y 23), a diferencia de lo obtenido en la nube de puntos referente a u_0/u_p vs Vh/A , se visualiza como ahora las soluciones no dominadas no corresponden a todas las configuraciones con menor diámetro. Aunque la mayoría de estas soluciones siguen siendo las correspondientes al diámetro menor ($0,2$ m), se aprecia algunas soluciones con diámetros de $0,3$ y $0,4$ metros entre los valores de rigidización u_0/u_p $[1,6$ $1,8]$ y $[1,15$ $1,30]$. Estos resultados son claramente, más fiables que los mostrados en la otra nube de puntos, pues aquí se tiene en cuenta todos los factores influyentes en el coste de los pilotes, estos son: los rendimientos y precios unitarios de hormigón, maquinaria y mano de obra; mientras que en la otra nube de puntos (u_0/u_p vs Vh/A) solo se tenía en cuenta el volumen de hormigón de los pilotes. En esta nube de puntos, también se refleja que el cambio en el diámetro de los pilotes supone un mayor incremento en el precio que incrementar la longitud de estos, debido a la mayor influencia que tiene el diámetro (al cuadrado) sobre el volumen. No obstante, la mayor reducción en el precio se produce al incrementar la distancia entre los pilotes, ya que, como es lógico, a mayor separación menor será el número de pilotes a ejecutar.

En las nubes de puntos u_0/u_p vs Coste por pilote/A (Ilustraciones 21, 22 y 23), se muestra como para niveles de rigidización considerables, comprendidas en el intervalo $[1,3$ $1,8]$, las soluciones óptimas corresponden a configuraciones de pilotes separados entre sí a una distancia de 1 metro ($S=1$ m, puntos azules). La mayoría de las soluciones no dominadas corresponden a pilotes esbeltos con longitudes iguales o superiores a 6 metros ($L \geq 6$ m) y a diámetros iguales o inferiores a $0,4$ metros ($D \leq 0,4$ m), normalmente, con diámetros inferiores a este valor (relación de esbeltez mínima $L/D=6/0,4=15$). Estas dimensiones podrían ser perfectamente las típicas de un micropilote, donde

los diámetros suelen rondar entre 20 y 30 cm. Para niveles de rigidización menores, comprendidas en el intervalo [1,15 1,3], pasa algo parecido, pero ahora con las configuraciones de pilotes con separaciones de 2 metros. Aquí, las configuraciones o soluciones no dominadas siguen siendo las correspondientes a diámetros pequeños ($D \leq 0,4 m$) y a longitudes también relativamente grandes ($L \geq 6m$).

El cambio del perfil geotécnico del suelo, no altera a las soluciones no dominadas del frente de Pareto, realmente, siguen siendo las mismas soluciones pero con pequeñas variaciones en las rigidizaciones que se obtienen para cada configuración.

Por último, destacar que ambas nubes de puntos muestran lo que ya se explicó en los anteriores apartados, el aumento del diámetro para pilotes con valores pequeños de longitudes, provoca pequeños aumentos en el ratio de desplazamientos, sin embargo, a medida que aumenta la longitud de los pilotes, la influencia que supone el aumentar el diámetro sobre la ganancia de rigidez del suelo incrementa. La longitud, por su parte, tiene una gran influencia en las rigidizaciones que se obtienen para terrenos blandos ($c_s=80 m/s$). A medida que aumenta la dureza del terreno, la influencia de la longitud de los pilotes sobre la rigidización del suelo tiende a ser menor, mientras que la tendencia rigidizadora del diámetro tiende a ser prácticamente la misma siempre.

1.7. Conclusiones

Con la realización de este estudio paramétrico, aparte de verificarse que los resultados obtenidos cumplen las condiciones más esperadas y lógicas, que eran obtener mayores ratios de desplazamientos en las configuraciones con menores separaciones, mayores longitudes, mayores diámetros y terrenos más desfavorables, se obtienen las siguientes conclusiones sobre la influencia de los distintos parámetros en la rigidización del suelo:

Influencia de D

- El ratio u_0/u_p sigue una variación prácticamente lineal con respecto al diámetro de los pilotes para cada separación y longitud.
- La pendiente de esta recta es mayor cuanto más esbelto es el pilote. Es decir, el diámetro tiene una mayor influencia sobre la rigidización del suelo a medida que aumenta la longitud del pilote.
- Al cambiar el tipo de suelo (c_s), se observa como las pendientes de las distintas rectas no varían, solo varía el punto de intercepción de las rectas con el eje de ordenadas, que se ve desplazado hacia abajo. Esto significa que la influencia rigidizadora del diámetro de los pilotes no varía sea cual sea el terreno sobre el que se refuerce.

Influencia de L

- A diferencia del diámetro, que tiene una variación prácticamente lineal con respecto al cociente u_0/u_p , la longitud tiene un comportamiento asintótico (convexo) sobre el ratio de desplazamientos (la rigidización del suelo tiende a hacerse constante).
- Para una misma separación, se aprecia que la influencia de la longitud sobre la rigidización del terreno es mayor que la influencia que tiene el diámetro sobre el mismo, al menos, hasta alcanzar cierta longitud ($L > 6$ m), a partir de la cual, el aumento del diámetro influye más en la ganancia de rigidez del terreno que el seguir incrementando la longitud.
- Al aumentar la dureza del terreno, a medida que incrementa la longitud, la asíntota tiende a caerse, de manera que el efecto rigidizador de la longitud de los pilotes se ve disminuido al aumentar c_s (la asíntota horizontal tiende a caer).

Influencia de S

- La influencia de la separación sobre el ratio de desplazamientos toma una forma asintótica cóncava (Ilustraciones 16, 17 y 18), a diferencia de las longitudes de los pilotes que mostraba una forma asintótica convexa.
- El cambio en la separación entre pilotes, provoca las mayores variaciones en la rigidización del suelo.
- El efecto rigidizador de la separación, está muy relacionado con el de la longitud, puesto que, por muy juntos que se dispongan los pilotes poco se rigidiza si estos no tienen una esbeltez considerable.
- El aumento de dureza del terreno, afecta a las separaciones de pilotes más pequeñas, es decir, a las que más rigidizan. A medida que incrementa la separación entre pilotes, la influencia que tiene el cambiar de terreno es cada vez menos relevante.

Nubes de puntos

Las soluciones no dominadas que forman la frontera de Pareto, corresponden en su mayoría a longitudes grandes ($L \geq 6m$) y diámetros que no suelen superar los 0,4 metros ($D \leq 0,4 m$). Por tanto, de estas nubes de puntos, se puede concluir que, para reforzar un terreno, lo ideal económica y estructuralmente hablando es disponer de pilotes/micropilotes esbeltos con diámetros relativamente pequeños (con una relación L/D no inferior a 15), y ya después dependiendo de cuánto sea necesario rigidizar el suelo, disponerlos más o menos cerca entre sí.

2. Estudio de aplicación

2.1. Objetivos

El objetivo de este estudio de aplicación o caso práctico es el de buscar para un terreno de relleno de la isla de Gran Canaria, las mejores soluciones en términos económicos y de ganancia de rigidez para diferentes grados de rigidización del suelo (distintos ratios de desplazamientos). Por último, una vez obtenidas las soluciones más idóneas, se pasará a estudiar toda la rigidización que se produce en el suelo al disponer estas configuraciones de pilotes más apropiadas.

2.2. Datos y parámetros del estudio

Este estudio de aplicación se definirá igual que el que se definió en el estudio paramétrico. Las condiciones de contorno de los pilotes, la zona de carga del suelo, así como su valor, el punto donde se calculará las rigidizaciones, las características – propiedades mecánicas de los pilotes y los valores que tomarán los distintos parámetros variables; serán los mismos que los definidos en el estudio paramétrico, excepto los valores tomados en la c_s , que en la definición del nuevo terreno ya se le asignará un único valor. De esta forma, lo único que va a variar con respecto al estudio paramétrico anterior es la caracterización del suelo.

▪ Características del terreno

Como ya se expuso en la memoria descriptiva (apartado 1.3), la parcela escogida se encuentra en la Avenida Finnair del municipio de San Bartolomé de Tirajana (sur de la isla de Gran Canaria). La caracterización que se le asignó a este suelo es también muy parecida a la escogida para el estudio paramétrico, pues todas las propiedades del suelo elegidas en el estudio paramétrico correspondían también a la litología típica de los terrenos de relleno. La excepción con respecto a las características del suelo que se escogieron en el estudio paramétrico es el coeficiente de Poisson (ν), que para el estudio paramétrico se escogió el valor correspondiente a arcillas blandas normalmente consolidadas (0,4), mientras que para este estudio de aplicación se escogerá el valor correspondiente a arenas y suelos granulares (0,3). Este cambio en el coeficiente de Poisson, hará que varíe también el módulo de elasticidad longitudinal del terreno, el terreno será más blando en este caso práctico en comparación al estudio paramétrico, pues el coeficiente de Poisson disminuye.

En cuanto al valor de la velocidad de propagación de las ondas de cizalla (c_s) que se le asignó al terreno, también se le asignó el valor anteriormente usado de 80 m/s, pues es un valor característico de los suelos caracterizados como muy blandos. Todo esto se encuentra explicado

con detalle en el Anexo I del presente trabajo, donde se justifica la elección de la parcela escogida y la caracterización asignada a la misma.

Las propiedades seleccionadas para la parcela son las que se muestran en la siguiente tabla (Tabla 5):

Parámetros de la parcela	
c_s	80 m/s
ν	0,3
ρ	1800 kg/m ³
G	1,152 · 10 ⁷ N/m ²
E	2,9952 · 10 ⁷ N/m ²

Tabla 5. Características del terreno escogido.

2.3. Búsqueda de las configuraciones idóneas

Una vez definidos todos los datos, se pasará a obtener primero la nube de puntos donde se representa u_0/u_p vs Coste por pilote/A, se usará esta nube de puntos porque es la más exacta, como ya se explicó en el estudio paramétrico. Una vez obtenida la nube de puntos (Ilustración 24), que como se aprecia, es muy parecida a la obtenida en el estudio paramétrico, se buscarán los casos o configuraciones con ratios de desplazamientos comprendidos en 1,75; 1,5 y 1,25. Se escogerán las configuraciones o casos con un valor de rigidez mayor o igual a los prefijados y con los menores costes posibles (relación Coste por pilote/A más pequeña). De esta forma, el proceso de búsqueda consistirá simplemente en buscar la solución más barata que proporcione un nivel de rigidez mayor o igual a los valores de rigidización seleccionados (1,75; 1,5 y 1,25).

Estas configuraciones más baratas para cada nivel de rigidez, se muestran en la siguiente tabla (Tabla 6), se comprueba además, como estas soluciones se corresponden al grupo de soluciones dada por el Frente de Pareto. Estas soluciones más económicas se encuentran remarcadas en la Ilustración 24, en el frente de Pareto. Se observa también, como estas soluciones con menores costes (Tabla 6) y que aseguran obtener los valores de rigidez designados son micropilotes.

D (m)	L (m)	S (m)	u_0/u_p	Coste por pilote/A (€/m ²)
$u_0/u_p > 1,75$				
0,3	10	1	1,777	118,27
$u_0/u_p > 1,50$				
0,2	8	1	1,555	66,50
$u_0/u_p > 1,25$				
0,2	4	1	1,294	52,21

Tabla 6. Configuraciones más económicas.

Una vez obtenidos los distintos casos más económicos para cada nivel de rigidización, se pasará a estudiar mediante mapas de colores (Ilustraciones 25, 26 y 27), los ratios de desplazamientos (u_0/u_p) que se producen en todo el suelo en el plano formado por los ejes x-z, plano OXZ, (o bien por el plano OYZ debido a la simetría del problema). Para ello, esta vez se calcularon las soluciones para un gran número de puntos a lo largo de todo el terreno, a diferencia de lo que se estuvo haciendo hasta ahora, que fue calcular las soluciones en un solo punto del terreno (punto P(0,0,1)). Se calcularon los desplazamientos del suelo en 2501 puntos, con saltos en la coordenada x de 0,1 metros desde la coordenada x=0m hasta x=6m; por su parte, en el eje z, se calcularon las soluciones en saltos de 0,25 metros desde z=0m hasta z=10m que es la longitud máxima que adoptan los pilotes definidos en el estudio.

Aunque el problema definido sea simétrico, en los mapas de colores (Ilustraciones 25, 26 y 27) se mostrará la representación completa para facilitar su comprensión y análisis. En ellos, se representan los pilotes con un trazado negro discontinuo, pues en el plano escogido para realizar estos mapas no se ven los pilotes. El eje de ordenadas marca la cota del terreno en el eje z, mientras que el eje de abscisas marca la cota del suelo en el eje x, por último, los distintos colores que forman el mapa, corresponden a los valores de la rigidización del suelo o del ratio de desplazamientos u_0/u_p .

A continuación, en el siguiente apartado 2.4, se muestran las distintas representaciones que se realizaron para este estudio de aplicación, la gráfica u_0/u_p vs Coste por pilote/A (Ilustración 24) y los mapas de colores obtenidos para los ratios 1,75 (Ilustración 25); 1,5 (Ilustración 26) y 1,25 (Ilustración 27). Posteriormente, en el apartado 2.5, se pasará a comentar estos resultados.

2.4. Representaciones

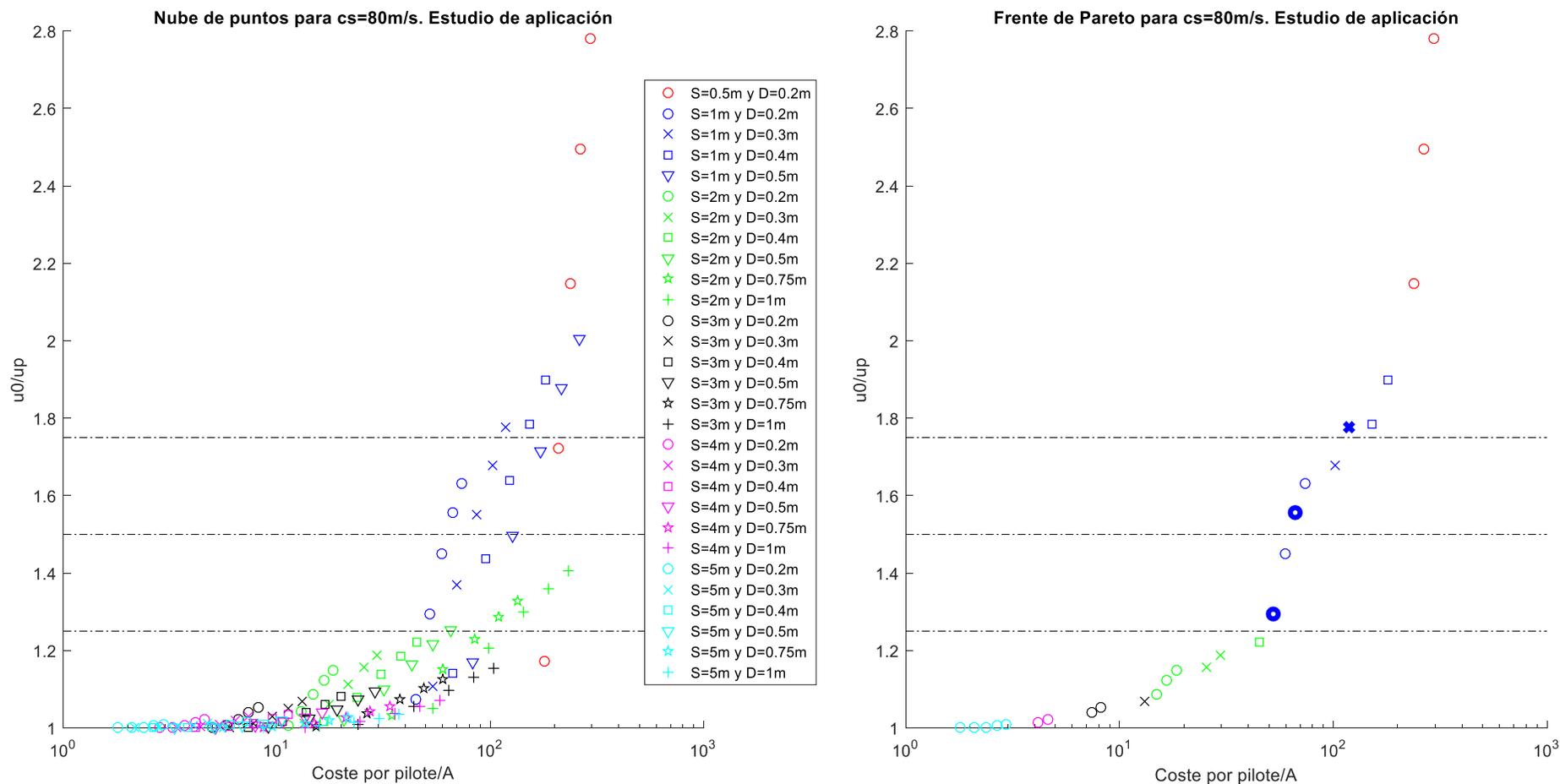


Ilustración 24. Representación u_0/up vs Coste por pilote/A, para $C_s=80\text{ m/s}$

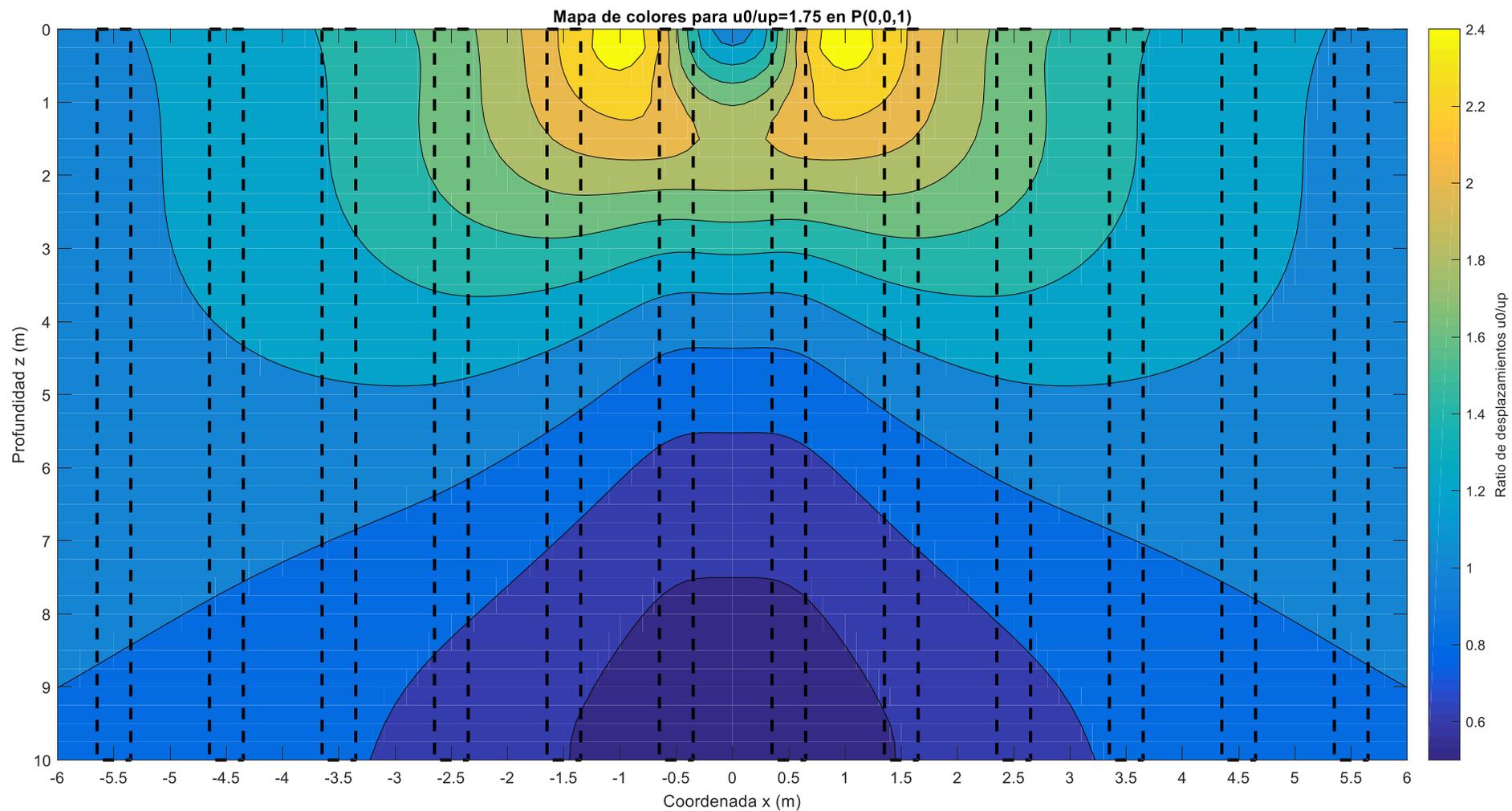


Ilustración 25. Mapa de colores para $u_0/u_p=1,75$ en $P(0,0,1)$.

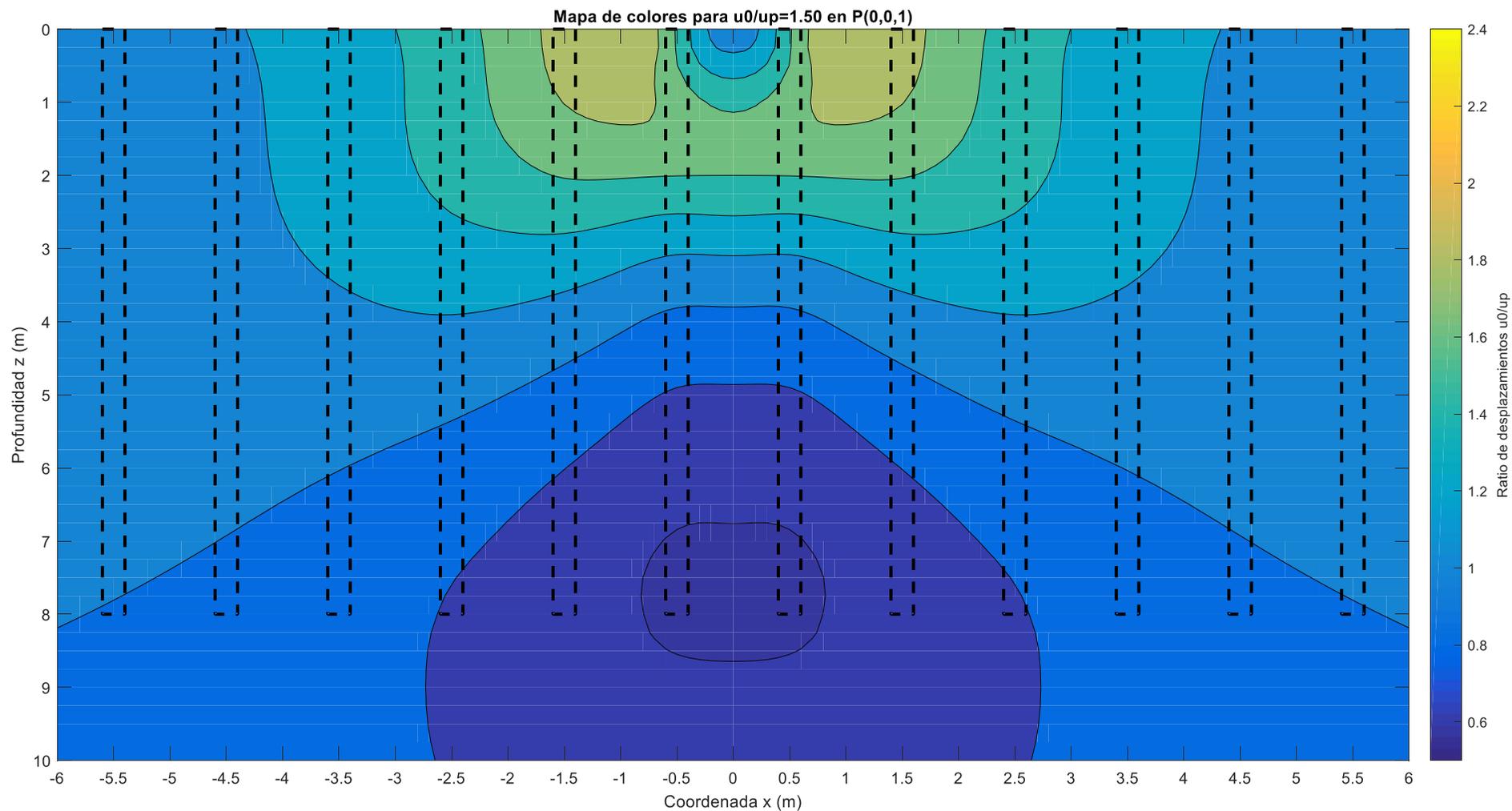


Ilustración 26. Mapa de colores para $u_0/u_p=1,50$ en $P(0,0,1)$.

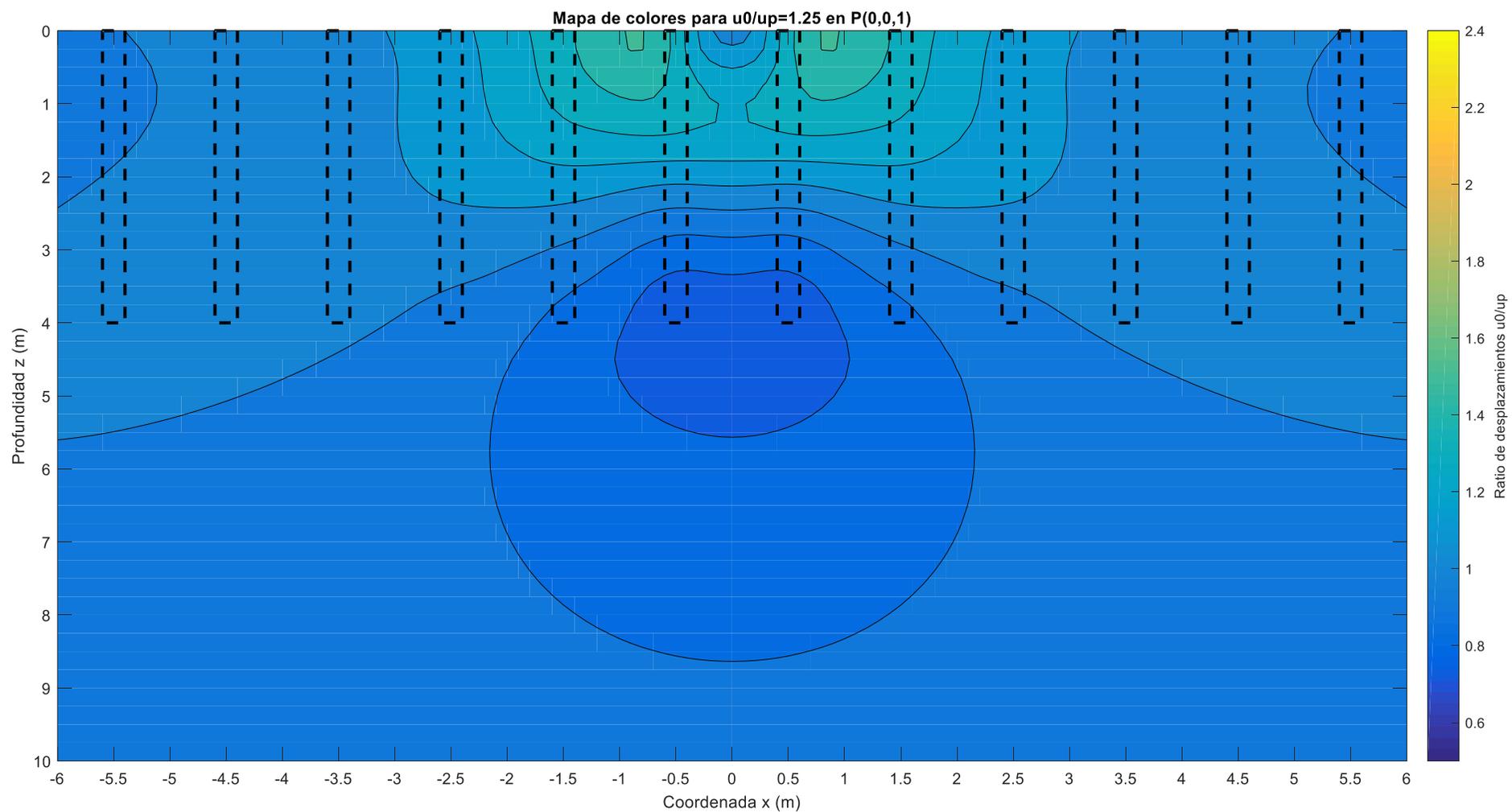


Ilustración 27. Mapa de colores para $u_0/up=1,25$ en $P(0,0,1)$.

2.5. Análisis de los resultados

En cuanto a la nube de puntos u_0/u_p vs Coste por pilote/A (Ilustración 24), se aprecia que es prácticamente igual que la obtenida en el estudio paramétrico (Ilustración 21), por lo que todo lo que se comentó sobre esta representación en el estudio paramétrico es aplicable a este caso práctico. Al final del Anexo I, se explican las ligeras variaciones que sufren los resultados al cambiar levemente el coeficiente de Poisson y la densidad del suelo. Se verifica además, como las configuraciones más adecuadas para los niveles de rigidización 1,75, 1,5 y 1,25 corresponden a las que se mostraron en la Tabla 6. Estas configuraciones se vuelven a mostrar a continuación para facilitar la explicación de los mapas de colores:

$$\frac{u_0}{u_p} = 1,75 \rightarrow D = 0,3m; L = 10m; S = 1m$$

$$\frac{u_0}{u_p} = 1,50 \rightarrow D = 0,2m; L = 8m; S = 1m$$

$$\frac{u_0}{u_p} = 1,25 \rightarrow D = 0,2m; L = 4m; S = 1m$$

En las Ilustraciones 25, 26 y 27, resulta muy significativo que las mayores rigidizaciones, se producen fuera de la zona de carga. Más concretamente, se dan en la superficie ($z=0m$) y en el eje x a una distancia que coincide con la separación entre pilotes (S) para el mapa de color correspondiente a $u_0/u_p=1,75$; para el mapa de color con $u_0/u_p=1,5$, el máximo ratio de desplazamientos también se da en esta zona; y para $u_0/u_p=1,25$ las mayores rigidizaciones se obtienen un poco antes de que se alcance la separación entre pilotes ($S=1m$) en el eje de abscisas (Ver ilustraciones 25, 26 y 27), donde las máximas rigidizaciones adquieren valores de 2,4; 2 y 1,5 respectivamente. Apreciando ambos mapas de colores, se observa como el nivel de rigidización máximo, tiende a acercarse más al centro del primer pilote colindante a la carga, a medida que disminuye la longitud de los pilotes. Para apreciar esto, basta con comparar las Ilustraciones 26 y 27 entre sí.

El hecho de que la mayor rigidización del suelo se haya producido fuera de la zona de carga y más alejada (en el eje x) que los centros de los primeros pilotes colindantes a la carga, se debe a que los pilotes están interactuando conjuntamente entre sí sirviendo de pantalla. Otra posible explicación a este fenómeno es que el análisis que se ha realizado es una comparación de respuestas punto a punto, por lo que la variación es relativa a la respuesta del suelo sin pilotes, lo que puede hacer que un ratio con un determinado valor tenga menos relevancia que otro valor de rigidización que es menor a ese primer ratio, ya que, un ratio de 2 puede ser menos importante que uno de 1,5 si el primero supone pasar de 0,01 a 0,005; mientras que el segundo pueda implicar pasar de 3 a 2.

A medida que se aleja de la zona de aplicación de la carga en el eje de abscisas, la tendencia rigidizadora tiende a decrecer y a mantenerse cada vez más constante al incrementar la coordenada x . En la Ilustración 25, donde se muestra el mapa de colores correspondiente a $u_0/u_p=1,75$ en $P(0,0,1)$, se aprecia que para valores de la coordenada x comprendidos entre $[-2,5 2,5]$ y hasta una profundidad (z) de 2,5 metros, las rigidizaciones que se obtienen son superiores al valor que se obtiene en el punto $P(0,0,1)$. En la Ilustración 26, en el mapa de colores correspondiente a $u_0/u_p=1,5$ en $P(0,0,1)$, se produce esto para los valores de la coordenada x comprendidos en $[-2,25 2,25]$ y hasta $z=2$ metros. Por su parte, en la Ilustración 27, el mapa de colores correspondiente a $u_0/u_p=1,25$ en $P(0,0,1)$, ocurre esto para valores de x comprendidos en el intervalo $[-1,75 1,75]$ y hasta una profundidad aproximada de 1,75 metros ($z=1,75m$). De esta forma, se comprueba que pilotes con mayores diámetros distribuyen de una forma más equilibrada las rigidizaciones horizontalmente (comparar Ilustraciones 25 y 26), y para pilotes con mayores longitudes se distribuyen mejor las rigidizaciones tanto horizontalmente como verticalmente a lo largo del suelo, de esta forma, el incremento de esbeltez de los pilotes genera una mayor y mejor distribución de las rigidizaciones en el terreno.

2.6. Conclusiones

Como conclusión a dicho estudio práctico, después de haberse elegido la parcela, las características del terreno (Anexo I del presente trabajo), y haber elegido las configuraciones más económicas para diferentes niveles de rigidización, se verificó que las mayores mejoras del terreno en rigidez se obtenían fuera de la zona de carga, más concretamente se producían en las celdas colindantes a la zona donde se aplica la carga, a consecuencia de la actuación conjunta de los pilotes. De forma que la rigidización que se obtuvo en el punto $P(0,0,1)$ no es más que un valor de rigidez orientativo y menor que las que realmente se obtienen en la superficie ($z=0$ m).

Por último, para concluir ya con lo expuesto, es importante también no olvidar que, en la realidad, la carga estaría por todo el terreno armado o repartida arbitrariamente en el mismo, y no únicamente en una zona concreta como se analizó en el estudio. Esto hará que el comportamiento que adopten las demás zonas del suelo colindantes a las otras cargas, sea muy parecido al comportamiento que ha adoptado este en su entorno más cercano a la carga definida en el presente estudio. Lo que provocará que se obtengan mayores valores de rigidización a lo largo del eje de abscisas, debido a la presencia de las múltiples cargas, por lo que realmente, el incremento en la rigidez del suelo va a ser más que notable a lo largo de la superficie del mismo.

3. Referencias

[1] – José Antonio Agudelo Zapata. (2015). Breve resumen del Coeficiente de Balasto. Consultado el 13 de marzo de 2020, en <http://estructurando.net/2015/10/26/breve-resumen-del-coeficiente-de-balasto/>

[2] – Universidad de Murcia, Escuela de Ingeniería Técnica Civil. (2007). Tipos de hormigón y sus propiedades. Recuperado el 13 de marzo de 2020, en https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6203/mod_resource/content/1/Hormigon_02._Tipos_y_propiedades.pdf

[3] – Construmática. Hormigón (cálculo). Consultado el 13 de marzo de 2020, en [https://www.construmatica.com/construpedia/Hormig%C3%B3n_\(c%C3%A1lculo\)](https://www.construmatica.com/construpedia/Hormig%C3%B3n_(c%C3%A1lculo))

PRESUPUESTOS DE LOS PILOTES ESTUDIADOS

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE SUELOS ARMADOS CON TÉCNICA DE PILOTAJE.
APLICACIÓN EN TERRENOS DE RELLENO EN GRAN CANARIA.

ÍNDICE

1. Objetivo	1
2. Resumen del presupuesto.....	1
3. Presupuesto detallado CPI-08.....	3
4. Referencias	10

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen del presupuesto por pilote para CPI-08.....	1
Tabla 2. Coste del transporte, puesta en obra y retirada del equipo de perforación para CPI-08.2	
Tabla 3. Resumen del presupuesto por pilote para CPI-04.....	2
Tabla 4. Coste del transporte, puesta en obra y retirada del equipo de perforación para CPI-04.2	
Tabla 5. Presupuesto detallado CPI-08, D=0,2m.....	3
Tabla 6. Presupuesto detallado CPI-08, D=0,3m.....	4
Tabla 7. Presupuesto detallado CPI-08, D=0,4m.....	5
Tabla 8. Presupuesto detallado CPI-08, D=0,5m.....	6
Tabla 9. Presupuesto detallado CPI-08, D=0,75m.....	7
Tabla 10. Presupuesto detallado CPI-08, D=1m.....	8
Tabla 11. Transporte, puesta en obra y retirada de equipo completo para perforación CPI-08..	9

1. Objetivo

El objetivo de este documento, es realizar un presupuesto de cada uno de los distintos pilotes definidos en el estudio paramétrico y en el de aplicación, que permita cuantificar cuánto es el presupuesto de ejecución por pilote según sea la longitud y diámetro que se desee emplear. Los resultados obtenidos fueron aplicados para realizar las nubes de puntos u_0/u_p vs Coste por pilote/A, tanto en el estudio paramétrico como en el de aplicación. El hormigón escogido para la realización del presupuesto es un hormigón en masa con resistencia características de 35 MPa, con tamaño máximo de árido 12 mm, consistencia fluida y clase de exposición no agresiva: HM-35/F/12/I.

Además, se mostrará una pequeña comparación entre los precios que se obtienen utilizando el método de pilotaje de extracción con barrena continua (CPI-08) y el método de pilotaje correspondiente a los pilotes de extracción con entubación recuperable (CPI-04), para justificar cuantitativamente la elección que se hizo del CPI-08. El coste de ejecutar los pilotes mediante el método de extracción con camisa perdida (CPI-05), no se mostrará, pues es más costoso aún que ejecutarlos por CPI-04.

A continuación, se mostrarán los resúmenes de los presupuestos de todos los pilotes ejecutados mediante CPI-08 y CPI-04. Por último, se mostrarán los distintos presupuestos detallados para todos los pilotes ejecutados mediante extracción con barrena continua (CPI-08), que fue el método elegido. Cada tabla que se muestra en el apartado 3, corresponde a un diámetro distinto con todas las longitudes estudiadas.

2. Resumen del presupuesto

Resumen del presupuesto por pilote para CPI-08

D (m)	L (m)	2	4	6	8	10
0,2	Coste total por pilote(€)	45,07	52,21	59,35	66,50	73,64
0,3	Coste total por pilote(€)	54,00	70,07	86,13	102,20	118,27
0,4	Coste total por pilote(€)	66,50	95,06	123,62	152,19	180,75
0,5	Coste total por pilote(€)	82,56	127,19	171,82	216,45	261,08
0,75	Coste total por pilote(€)	138,35	238,77	339,19	439,60	540,02
1	Coste total por pilote(€)	216,45	394,97	573,50	752,02	930,54

Tabla 1. Resumen del presupuesto por pilote para CPI-08.

Coste total del transporte, puesta en obra y retirada del equipo de perforación (€)
4641,00

Tabla 2. Coste del transporte, puesta en obra y retirada del equipo de perforación para CPI-08.

Resumen del presupuesto por pilote para CPI-04

D (m)	L (m)	2	4	6	8	10
0,2	Coste total por pilote(€)	86,67	111,18	135,69	160,20	184,70
0,3	Coste total por pilote(€)	117,31	172,45	227,59	282,73	337,87
0,4	Coste total por pilote(€)	160,20	258,22	356,25	454,28	552,31
0,5	Coste total por pilote(€)	215,34	368,51	521,68	674,85	828,02
0,75	Coste total por pilote(€)	406,80	751,43	1096,06	1440,69	1785,33
1	Coste total por pilote(€)	674,85	1287,52	1900,20	2512,88	3125,56

Tabla 3. Resumen del presupuesto por pilote para CPI-04.

Coste total del transporte, puesta en obra y retirada del equipo de perforación (€)
9669,60

Tabla 4. Coste del transporte, puesta en obra y retirada del equipo de perforación para CPI-04.

Se aprecia como el método de extracción con entubación recuperable (CPI-04), es mucho más caro que el método de extracción con barrena continua (CPI-08). Por ello, se eligió esta última como método de ejecución de los pilotes que tendrán como objetivo reforzar el suelo, ya que, como ya se explicó en la memoria descriptiva, lo ideal para una técnica de refuerzo del terreno, aparte de mejorar las características portantes del suelo, es que sea poco costosa económicamente hablando.

3. Presupuesto detallado CPI-08

CPI080	ud	Pilote barrenado y hormigonado por tubo central de barrena.											
Pilote de cimentación de hormigón en masa de 20 cm de diámetro, para grupo de pilotes CPI-8 según NTE-CPI. Ejecutado por barrenado de tierras mediante sistema mecánico, sin entibación y posterior hormigonado continuo en seco por bombeo a través del fuste del útil de perforación del pilote. Realizado con hormigón HM-35/F/12/l fabricado en central, y vertido desde camión a bomba estacionaria. El precio incluye el transporte, la instalación, el montaje y el desmontaje del equipo mecánico.													
Código	Unidad	Descripción	Características geométricas del pilote:		0,2								
			D (m)	L (m)	2		4		6		8		10
			Precio unitario	Rendimiento	Importe								
1 - MATERIALES													
mt10haf010nba	m ³	Hormigón HM-35/F/12/l, fabricado en central.	85,09	0,063	5,35	0,126	10,69	0,188	16,04	0,251	21,39	0,314	26,73
		Subtotal materiales:			5,35		10,69		16,04		21,39		26,73
2 - EQUIPO Y MAQUINARIA													
mq03pii108a	h	Equipo completo para perforación de pilote barrenado y hormigonado por tubo central de barrena, CPI-8.	175,00	0,080	14,04	0,085	14,96	0,091	15,87	0,096	16,79	0,101	17,71
mq06bhe020	h	Bomba estacionaria, para bombeo de hormigón.	56,00	0,050	2,81	0,053	2,95	0,055	3,10	0,058	3,25	0,061	3,39
		Subtotal equipo y maquinaria:			16,85		17,91		18,97		20,04		21,10
3 - MANO DE OBRA													
mo045	h	Oficial 1ª estructurista, en trabajos de puesta en obra del hormigón.	19,37	0,584	11,31	0,600	11,62	0,615	11,92	0,631	12,23	0,647	12,53
mo092	h	Ayudante estructurista, en trabajos de puesta en obra del hormigón.	18,29	0,584	10,68	0,600	10,97	0,615	11,26	0,631	11,54	0,647	11,83
		Subtotal mano de obra:			21,99		22,59		23,18		23,77		24,36
4 - COSTES DIRECTOS COMPLEMENTARIOS													
	%	Costes directos complementarios	(1+2+3)	2,000	0,88	2,000	1,02	2,000	1,16	2,000	1,30	2,000	1,44
		Coste de mantenimiento decenal: 1,19€ en los primeros 10 años.	Costes directos (1+2+3+4):		45,07		52,21		59,35		66,50		5,00

Tabla 5. Presupuesto detallado CPI-08, D=0,2m

CPI080	ud	Pilote barrenado y hormigonado por tubo central de barrena.											
Pilote de cimentación de hormigón en masa de 30 cm de diámetro, para grupo de pilotes CPI-8 según NTE-CPI. Ejecutado por barrenado de tierras mediante sistema mecánico, sin entibación y posterior hormigonado continuo en seco por bombeo a través del fuste del útil de perforación del pilote. Realizado con hormigón HM-35/F/12/I fabricado en central, y vertido desde camión a bomba estacionaria. El precio incluye el transporte, la instalación, el montaje y el desmontaje del equipo mecánico.													
Código	Unidad	Descripción	Características geométricas del pilote:		0,3								
			D (m)	L (m)	2		4		6		8		10
			Precio unitario	Rendimiento	Importe	Rendimiento	Importe	Rendimiento	Importe	Rendimiento	Importe	Rendimiento	Importe
1 - MATERIALES													
mt10haf010nba	m ³	Hormigón HM-35/F/12/I, fabricado en central.	85,09	0,141	12,03	0,283	24,06	0,424	36,09	0,565	48,12	0,707	60,15
		Subtotal materiales:			12,03		24,06		36,09		48,12		60,15
2 - EQUIPO Y MAQUINARIA													
mq03pii108a	h	Equipo completo para perforación de pilote barrenado y hormigonado por tubo central de barrena, CPI-8.	175,00	0,087	15,19	0,099	17,25	0,110	19,31	0,122	21,37	0,134	23,43
mq06bhe020	h	Bomba estacionaria, para bombeo de hormigón.	56,00	0,053	2,99	0,059	3,32	0,065	3,65	0,071	3,98	0,077	4,31
		Subtotal equipo y maquinaria:			18,18		20,57		22,96		25,35		27,74
3 - MANO DE OBRA													
mo045	h	Oficial 1ª estructurista, en trabajos de puesta en obra del hormigón.	19,37	0,604	11,69	0,639	12,38	0,674	13,06	0,710	13,75	0,745	14,43
mo092	h	Ayudante estructurista, en trabajos de puesta en obra del hormigón.	18,29	0,604	11,04	0,639	11,69	0,674	12,33	0,710	12,98	0,745	13,63
		Subtotal mano de obra:			22,73		24,07		25,40		26,73		28,06
4 - COSTES DIRECTOS COMPLEMENTARIOS													
	%	Costes directos complementarios	(1+2+3)	2,000	1,06	2,000	1,37	2,000	1,69	2,000	2,00	2,000	2,32
Coste de mantenimiento decenal: 1,19€ en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3+4):		54,00		70,07		86,13		102,20		118,27

Tabla 6. Presupuesto detallado CPI-08, D=0,3m

CPI08	ud	Pilote barrenado y hormigonado por tubo central de barrena.											
Pilote de cimentación de hormigón en masa de 40 cm de diámetro, para grupo de pilotes CPI-8 según NTE-CPI. Ejecutado por barrenado de tierras mediante sistema mecánico, sin entibación y posterior hormigonado continuo en seco por bombeo a través del fuste del útil de perforación del pilote. Realizado con hormigón HM-35/F/12/l fabricado en central, y vertido desde camión a bomba estacionaria. El precio incluye el transporte, la instalación, el montaje y el desmontaje del equipo mecánico.													

Código	Unidad	Descripción	Características geométricas del pilote:		0,4									
			D (m)	L (m)	2		4		6		8		10	
			Precio unitario	Rendimiento	Importe	Rendimiento	Importe	Rendimiento	Importe	Rendimiento	Importe	Rendimiento	Importe	
1 - MATERIALES														
mt10haf010nba	m³	Hormigón HM-35/F/12/l, fabricado en central.	85,09	0,251	21,39	0,503	42,77	0,754	64,16	1,005	85,54	1,257	106,93	
		Subtotal materiales:			21,39		42,77		64,16		85,54		106,93	
2 - EQUIPO Y MAQUINARIA														
mq03pii108a	h	Equipo completo para perforación de pilote barrenado y hormigonado por tubo central de barrena, CPI-8.	175,00	0,096	16,79	0,117	20,46	0,138	24,12	0,159	27,79	0,180	31,45	
mq06bhe020	h	Bomba estacionaria, para bombeo de hormigón.	56,00	0,058	3,25	0,068	3,83	0,079	4,42	0,089	5,01	0,100	5,59	
		Subtotal equipo y maquinaria:			20,04		24,29		28,54		32,79		37,04	
3 - MANO DE OBRA														
mo045	h	Oficial 1ª estructurista, en trabajos de puesta en obra del hormigón.	19,37	0,631	12,23	0,694	13,44	0,757	14,66	0,820	15,88	0,882	17,09	
mo092	h	Ayudante estructurista, en trabajos de puesta en obra del hormigón.	18,29	0,631	11,54	0,694	12,69	0,757	13,84	0,820	14,99	0,882	16,14	
		Subtotal mano de obra:			23,77		26,14		28,50		30,87		33,23	
4 - COSTES DIRECTOS COMPLEMENTARIOS														
	%	Costes directos complementarios	(1+2+3)	2,000	1,30	2,000	1,86	2,000	2,42	2,000	2,98	2,000	3,54	
Coste de mantenimiento decenal: 1,19€ en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3+4):		66,50		95,06		123,62		152,19		180,75	

Tabla 7. Presupuesto detallado CPI-08, D=0,4m

CPI080	ud	Pilote barrenado y hormigonado por tubo central de barrena.
Pilote de cimentación de hormigón en masa de 50 cm de diámetro, para grupo de pilotes CPI-8 según NTE-CPI. Ejecutado por barrenado de tierras mediante sistema mecánico, sin entibación y posterior hormigonado continuo en seco por bombeo a través del fuste del útil de perforación del pilote. Realizado con hormigón HM-35/F/12/l fabricado en central, y vertido desde camión a bomba estacionaria. El precio incluye el transporte, la instalación, el montaje y el desmontaje del equipo mecánico.		

Código	Unidad	Descripción	Características geométricas del pilote:		0,5								
			D (m)	L (m)	2		4		6		8		10
			Precio unitario	Rendimiento	Importe	Rendimiento	Importe	Rendimiento	Importe	Rendimiento	Importe	Rendimiento	Importe
1 - MATERIALES													
mt10haf010nba	m³	Hormigón HM-35/F/12/l, fabricado en central.	85,09	0,393	33,41	0,785	66,83	1,178	100,24	1,571	133,66	1,963	167,07
		Subtotal materiales:			33,41		66,83		100,24		133,66		167,07
2 - EQUIPO Y MAQUINARIA													
mq03pii108a	h	Equipo completo para perforación de pilote barrenado y hormigonado por tubo central de barrena, CPI-8.	175,00	0,108	18,85	0,140	24,58	0,173	30,31	0,206	36,03	0,239	41,76
mq06bhe020	h	Bomba estacionaria, para bombeo de hormigón.	56,00	0,064	3,58	0,080	4,49	0,097	5,41	0,113	6,33	0,129	7,24
		Subtotal equipo y maquinaria:			22,43		29,07		35,71		42,36		49,00
3 - MANO DE OBRA													
mo045	h	Oficial 1ª estructurista, en trabajos de puesta en obra del hormigón.	19,37	0,667	12,91	0,765	14,81	0,863	16,71	0,961	18,62	1,059	20,52
mo092	h	Ayudante estructurista, en trabajos de puesta en obra del hormigón.	18,29	0,667	12,19	0,765	13,99	0,863	15,78	0,961	17,58	1,059	19,37
		Subtotal mano de obra:			25,10		28,80		32,50		36,19		39,89
4 - COSTES DIRECTOS COMPLEMENTARIOS													
	%	Costes directos complementarios	(1+2+3)	2,000	1,62	2,000	2,49	2,000	3,37	2,000	4,24	2,000	5,12
		Coste de mantenimiento decenal: 1,19€ en los primeros 10 años.	Costes directos (1+2+3+4):		82,56		127,19		171,82		216,45		261,08

Tabla 8. Presupuesto detallado CPI-08, D=0,5m

CPI080	ud	Pilote barrenado y hormigonado por tubo central de barrena.
Pilote de cimentación de hormigón en masa de 75 cm de diámetro, para grupo de pilotes CPI-8 según NTE-CPI. Ejecutado por barrenado de tierras mediante sistema mecánico, sin entibación y posterior hormigonado continuo en seco por bombeo a través del fuste del útil de perforación del pilote. Realizado con hormigón HM-35/F/12/I fabricado en central, y vertido desde camión a bomba estacionaria. El precio incluye el transporte, la instalación, el montaje y el desmontaje del equipo mecánico.		

Características geométricas del pilote:			0,75										
Código	Unidad	Descripción	D (m)	2		4		6		8		10	
			L (m)	Rendimiento	Importe	Rendimiento	Importe	Rendimiento	Importe	Rendimiento	Importe	Rendimiento	Importe
1 - MATERIALES													
mt10haf010nba	m ³	Hormigón HM-35/F/12/I, fabricado en central.	85,09	0,884	75,18	1,767	150,37	2,651	225,55	3,534	300,73	4,418	375,92
Subtotal materiales:					75,18		150,37		225,55		300,73		375,92
2 - EQUIPO Y MAQUINARIA													
mq03pii108a	h	Equipo completo para perforación de pilote barrenado y hormigonado por tubo central de barrena, CPI-8.	175,00	0,149	26,01	0,222	38,90	0,296	51,78	0,370	64,67	0,443	77,55
mq06bhe020	h	Bomba estacionaria, para bombeo de hormigón.	56,00	0,084	4,72	0,121	6,78	0,158	8,85	0,195	10,91	0,232	12,97
Subtotal equipo y maquinaria:					30,73		45,68		60,63		75,57		90,52
3 - MANO DE OBRA													
mo045	h	Oficial 1ª estructurista, en trabajos de puesta en obra del hormigón.	19,37	0,789	15,29	1,010	19,57	1,231	23,84	1,452	28,12	1,673	32,40
mo092	h	Ayudante estructurista, en trabajos de puesta en obra del hormigón.	18,29	0,789	14,43	1,010	18,48	1,231	22,52	1,452	26,56	1,673	30,60
Subtotal mano de obra:					29,72		38,04		46,36		54,68		63,00
4 - COSTES DIRECTOS COMPLEMENTARIOS													
	%	Costes directos complementarios	(1+2+3)	2,000	2,71	2,000	4,68	2,000	6,65	2,000	8,62	2,000	10,59
Coste de mantenimiento decenal: 1,19€ en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3+4):	138,35		238,77		339,19		439,60		540,02	

Tabla 9. Presupuesto detallado CPI-08, D=0,75m

CPI080	ud	Pilote barrenado y hormigonado por tubo central de barrena.											
Pilote de cimentación de hormigón en masa de 100 cm de diámetro, para grupo de pilotes CPI-8 según NTE-CPI. Ejecutado por barrenado de tierras mediante sistema mecánico, sin entibación y posterior hormigonado continuo en seco por bombeo a través del fuste del útil de perforación del pilote. Realizado con hormigón HM-35/F/12/I fabricado en central, y vertido desde camión a bomba estacionaria. El precio incluye el transporte, la instalación, el montaje y el desmontaje del equipo mecánico.													
Código	Unidad	Descripción	Características geométricas del pilote:		1								
			D (m)	L (m)	2		4		6		8		10
			Precio unitario	Rendimiento	Importe								
1 - MATERIALES													
mt10haf010nba	m³	Hormigón HM-35/F/12/I, fabricado en central.	85,09	1,571	133,66	3,142	267,32	4,712	400,98	6,283	534,64	7,854	668,30
Subtotal materiales:					133,66		267,32		400,98		534,64		668,30
2 - EQUIPO Y MAQUINARIA													
mq03pii108a	h	Equipo completo para perforación de pilote barrenado y hormigonado por tubo central de barrena, CPI-8.	175,00	0,206	36,03	0,337	58,94	0,468	81,85	0,599	104,75	0,729	127,66
mq06bhe020	h	Bomba estacionaria, para bombeo de hormigón.	56,00	0,113	6,33	0,178	9,99	0,244	13,66	0,309	17,32	0,375	20,99
Subtotal equipo y maquinaria:					42,36		68,93		95,50		122,08		148,65
3 - MANO DE OBRA													
mo045	h	Oficial 1ª estructurista, en trabajos de puesta en obra del hormigón.	19,37	0,961	18,62	1,354	26,22	1,746	33,83	2,139	41,43	2,532	49,04
mo092	h	Ayudante estructurista, en trabajos de puesta en obra del hormigón.	18,29	0,961	17,58	1,354	24,76	1,746	31,94	2,139	39,12	2,532	46,31
Subtotal mano de obra:					36,19		50,98		65,77		80,56		95,35
4 - COSTES DIRECTOS COMPLEMENTARIOS													
	%	Costes directos complementarios	(1+2+3)	2,000	4,24	2,000	7,74	2,000	11,25	2,000	14,75	2,000	18,25
Coste de mantenimiento decenal: 1,19€ en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3+4):	216,45		394,97		573,50		752,02		930,54	

Tabla 10. Presupuesto detallado CPI-08, D=1m

CPI001	Ud	Transporte, puesta en obra y retirada de equipo completo para perforación de pilotes.			
Transporte, puesta en obra y retirada de equipo completo de perforación, para la realización de pilotes barrenado y hormigonado por tubo central de barrena, CPI-8, a una distancia de entre 50 y 100 km. El precio incluye el desplazamiento a la obra del personal especializado.					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1 - Equipo y Maquinaria					
mq03pii010t	Ud	Transporte, puesta en obra y retirada de equipo completo para perforación de pilote barrenado y hormigonado por tubo central de barrena, CPI-8, a una distancia de entre 50 y 100 km, limpieza y retirada de sobrantes.	1,000	4550,00	4550,00
			Subtotal equipo y maquinaria:		4550,00
2 - Costes directos complementarios					
	%	Costes directos complementarios	2,000	4550,00	91,00
			Costes directos (1+2):		4641,00

Tabla 11. Transporte, puesta en obra y retirada de equipo completo para perforación CPI-08.

4. Referencias

Todo el presupuesto presentado, fue elaborado tomando como referencia los rendimientos y precios unitarios para los pilotes CPI-08 que proporciona el Generador de precios de la construcción, España, Cype Ingenieros, S.A. Disponible en: <http://www.generadordeprecios.info/>

ANEXO I: JUSTIFICACIÓN DE LA ELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DEL TERRENO

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE SUELOS ARMADOS CON TÉCNICA DE PILOTAJE.
APLICACIÓN EN TERRENOS DE RELLENO EN GRAN CANARIA.

ÍNDICE

1. Objetivos	1
2. Clasificación de los suelos y terrenos	1
2.1. Clasificación de los suelos según sus características organolépticas	1
2.2. Clasificación de los terrenos según el CTE	2
2.3. Parámetros de los distintos tipos de terrenos	2
3. Ubicación seleccionada	5
3.1. Criterio de selección	6
3.2. Litología de la parcela	7
3.2.1. Descripción de la litología	8
3.3. Características de la zona y de la parcela	9
3.4. Asignación de los parámetros elásticos a la parcela	10
3.4.1. Comprobación en la sensibilidad de la toma de parámetros	11
4. Referencias	15

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Parcela clasificada como terreno desfavorable (Tipo T-3 según CTE). Fuente: GRAFCAN [6].	6
Ilustración 2. Litología de la parcela - Depósito antrópico. Fuente: GRAFCAN [6].	7
Ilustración 3. Parcela vista desde la fachada. Fuente: Google Maps [8].	7
Ilustración 4. Parcela situada en zona urbana. Fuente: GRAFCAN [6].....	9
Ilustración 5. Diferencias en %, de las rigidizaciones obtenidas para dos suelos idénticos, pero con distinta densidad (1800-1900kg/m ³).	13
Ilustración 6. Diferencias en %, de las rigidizaciones obtenidas para dos suelos idénticos, pero con distinto coeficiente de Poisson (0,3-0,4).....	14

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Módulos de Elasticidad de distintos tipos de suelos [2].	3
Tabla 2. Coeficientes de Poisson de distintos tipos de suelos [2].....	3
Tabla 3. Peso específico aparente de distintas clases de suelos [2].	3
Tabla 4. Velocidades de cizalla de distintos terrenos según la Norma Sismorresistente Española [3].	4
Tabla 5. Clasificación de los suelos según el Eurocódigo 8, atendiendo a la velocidad de propagación de las ondas de cizalla [4].	4
Tabla 6. Clasificación de los suelos atendiendo a la velocidad de propagación de las ondas de cizalla, propuesta por Borchardt (1994) [5].....	5
Tabla 7. Características de la parcela [11].	9
Tabla 8. Parámetros elásticos de la parcela.....	11

1. Objetivos

Este anexo tratará de justificar la elección del emplazamiento, así como, una vez clasificados los tipos de terrenos y conocidos sus parámetros fundamentales, se pasará a otorgarle una caracterización al mismo (asignación de parámetros), en base a la composición típica de los terrenos de relleno.

2. Clasificación de los suelos y terrenos

En este apartado se tratará de clasificar los suelos atendiendo a sus características organolépticas y a la clasificación que se expone en el CTE.

2.1. Clasificación de los suelos según sus características organolépticas

Atendiendo a las características organolépticas de los suelos, estos se pueden dividir en dos grupos:

- **Granulares, incoherentes o no cohesivos:** estos están constituidos por granos sueltos que no tienden a juntarse ni adherirse, es el caso de las gravas y arenas. Las únicas fuerzas que actúan entre ellos son las de rozamiento. Constituyen una buena base de cimentación si se encuentran bien compactados y se presentan en estratos de altura suficiente. Deben estar bien delimitados, de tal forma que no tengan posibilidad de desplazarse. La grava, al estar constituida por trozos de rocas disgregadas, suele ser un buen firme de cimentación cuando se encuentra compactada y no se halla sobre un estrato de terreno de mala calidad. Las arenas, al tratarse de pequeñas partículas de material rocoso, para constituir un buen suelo de cimentación, deben hallarse en un recinto bien delimitado por estratos de otros terrenos suficientemente estables. El grado de humedad influye decisivamente en que las arenas tengan una determinada resistencia [1].
- **Coherentes o cohesivos:** en este grupo se encuentran los suelos que han de tener un grado de humedad constante para lograr cierta resistencia, es el caso de los limos y arcillas. Debe evitarse tanto que puedan captar agua como que se produzca una desecación excesiva del terreno. Los terrenos arcillosos suelen ser unas masas plásticas que, debido a su contenido de humedad, al secarse, sufren importantes contracciones de volumen y, por el contrario, al captar agua, de la que son muy ávidas, pueden sufrir importantes aumentos de volumen. Se trata de suelos bastantes resistentes como firme de cimentación, pero teniendo la seguridad de que no puedan afectarle los cambios en cuanto a su grado de humedad, por lo que debe preverse la construcción de sistemas de drenaje [1].

Las partículas del suelo reciben distintas denominaciones según su tamaño y textura, en esta clasificación se tienen [1]:

- **Gravas:** Son partículas visibles y gruesas con un diámetro aproximado mayor que 2 mm, generalmente entre 2 mm y 75 mm.
- **Arenas:** Partículas visibles y finas con un diámetro aproximado menor a 2 mm, generalmente entre 0,05 mm y 2 mm.
- **Limos:** Son partículas no visibles con tacto áspero, con tamaños entre 0,002 mm y 0,05 mm.
- **Arcillas:** Son partículas no visibles con tacto suave, con tamaños inferiores a 0,002 mm.

2.2. Clasificación de los terrenos según el CTE

En la tabla 3.2 del DBSE-C del CTE [2], se establecen tres diferentes grupos de terrenos:

- Terrenos favorables (T-1): aquellos con poca variabilidad, y en los que la práctica habitual en la zona es de cimentación directa mediante elementos aislados.
- Terrenos intermedios (T-2): los que presentan variabilidad, o que en la zona no siempre se recurre a la misma solución de cimentación, o en los que se puede suponer que tienen rellenos antrópicos de cierta relevancia, aunque probablemente no superen los 3,0 metros.
- Terrenos desfavorables (T-3): los que no pueden clasificarse en ninguno de los tipos anteriores. De forma especial se considerarán en este grupo los siguientes terrenos:
 - a) Suelos expansivos
 - b) Suelos colapsables
 - c) Suelos blandos o sueltos
 - d) Terrenos kársticos en yesos o calizas
 - e) Terrenos variables en cuanto a composición y estado
 - f) Rellenos antrópicos con espesores superiores a 3 m
 - g) Terrenos en zonas susceptibles de sufrir deslizamientos
 - h) Rocas volcánicas en coladas delgadas o con cavidades
 - i) Terrenos con desnivel superior a 15º
 - j) Suelos residuales
 - k) Terrenos de marismas

2.3. Parámetros de los distintos tipos de terrenos

En este apartado se mostrarán algunas tablas con los valores más usuales de ciertos parámetros que definen el terreno, como son el módulo de elasticidad (Tabla 1), el coeficiente de Poisson (Tabla

2), la densidad o peso específico (Tabla 3) y la velocidad de propagación de las ondas de cizalla (c_s) sobre el terreno (Tablas 4, 5 y 6). Los parámetros de la parcela escogida se basarán en escoger para estas tablas, los valores correspondientes a los suelos que más se asemejen a las características organolépticas de los terrenos de relleno.

Tipo de suelo	E (MN/m ²)
Suelos muy flojos o muy blandos	< 8
Suelos flojos o blandos	8 - 40
Suelos medios	40 - 100
Suelos compactos o duros	100 – 500
Rocas blandas	500 – 8.000
Rocas duras	8.000 – 15.000
Rocas muy duras	>15.000

Tabla 1. Módulos de Elasticidad de distintos tipos de suelos [2].

Tipo de suelo	Coefficiente de Poisson
Arcillas blandas normalmente consolidadas	0,40
Arcillas medias	0,30
Arcillas duras preconsolidadas	0,15
Arenas y suelos granulares	0,30

Tabla 2. Coeficientes de Poisson de distintos tipos de suelos [2].

Clase de suelo		Peso específico aparente (kN/m ³)
Terreno natural	Grava	19-22
	Arena	17-20
	Limo	17-20
	Arcilla	15-22
Rellenos	Tierra vegetal	17
	Terraplén	17
	Pedraplén	18

Tabla 3. Peso específico aparente de distintas clases de suelos [2].

Tipo de suelo	Descripción	c_s (m/s)
I	Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso	>750
II	Roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros	750-400
III	Suelo granular de compactación media, o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme	400-200
IV	Suelo granular suelto o suelo cohesivo blando.	<200

Tabla 4. Velocidades de cizalla de distintos terrenos según la Norma Sismorresistente Española [3].

Terreno tipo	Descripción	c_s
A	Roca u otra formación con al menos 5 metros de material meteorizado en superficie.	$c_s > 800$ m/s
B	Depósitos de arena densa, grava o arcilla muy dura de varios metros de potencia caracterizada por un incremento de sus propiedades mecánicas.	$800 > c_s > 360$ m/s
C	Depósitos profundos de arena densa a medio densa, grava o arcilla dura con potencias de varias decenas a centenares de metros.	$360 > c_s > 180$ m/s
D	Depósitos de suelos sueltos a medio cohesivos (con o sin niveles cohesivos blandos) o bien suelos cohesivos blandos o duros predominantemente.	$c_s < 180$ m/s
E	Perfil de suelo que consiste en un nivel aluvial en la superficie con valores de C_s de clase C,D y potencia variable entre 5 y 20 metros, situados sobre un material más duro de $C_s > 800$ m/s.	
S1	Depósitos que consisten en arcillas o limos con un índice de plasticidad alto (>40) y un alto contenido en agua.	$c_s < 100$ m/s
S2	Depósitos formados por suelos licuables, arcillas sensitivas o cualquier otro tipo de perfil incluido en las clases A, E o S1.	

Tabla 5. Clasificación de los suelos según el Eurocódigo 8, atendiendo a la velocidad de propagación de las ondas de cizalla [4].

Tipo de suelo		Criterio de clasificación			
Nombre		Descripción general	Velocidad mínima de cizalla (m/s)	Velocidad media de cizalla (m/s)	Velocidad máxima de cizalla (m/s)
SC-I		Roca firme y dura			
SC-Ia	A	Roca dura (ej. Roca metamórfica con fracturas muy extendidas)	1320	1400	1480
SC-Ib	B	Roca firme y dura (ej. Granito, roca ígnea, conglomerados, areniscas y esquistos con fracturas cercanas y más espaciadas entre sí)	700	1050	1400
SC-II	B	Suelo pedregosos y roca de blanda a dura. Roca blanda sedimentaria ígnea, areniscas y esquistos, gravilla, suelos con > 20% gravilla	375	540	700
SC-III	C	Arcillas consistentes y suelos arenosos (ej. Arenas de consistencia suave a densa, margas y arcilla arenosa, y arcillas de consistencia suave a dura, y arcillas sedimentarias)	200	290	375
SC-IV	D	Suelos blandos	100	150	200
SC-IVa	DI	Suelos blandos no estudiados específicamente (relleno suelto sumergido, arcillas muy blandas, y arcillas sedimentarias de espesor < 37 m)			
SC-IVb	E	Suelos blandos específicamente estudiados (suelos bajo licuefacción, arcillas altamente orgánicas, arcillas de un grado alto de plasticidad y suelos blandos con más de 37 m)			

Tabla 6. Clasificación de los suelos atendiendo a la velocidad de propagación de las ondas de cizalla, propuesta por Borcherdt (1994) [5].

3. Ubicación seleccionada

Como ya se explicó en el apartado 1.3 de la memoria descriptiva, la parcela elegida se encuentra en la Avenida Finnair en el municipio de San Bartolomé de Tirajana, al sur de la isla de Gran Canaria.

En este apartado se justificará la elección de la parcela, así como, se proporcionará información sobre esta.

3.1. Criterio de selección

Para la búsqueda y selección del terreno a estudio, en primer lugar, se pretendió encontrar una parcela (suelo no edificado) con clasificación de terreno desfavorable según redacta el CTE (Terreno tipo T-3). En segundo lugar, se filtró la búsqueda de manera que la parcela elegida se tratara de un terreno de relleno. A continuación, se muestran estos filtros de búsqueda (Ilustraciones 1 y 2), para su elección y búsqueda se usó la aplicación Visor de la página web GRAFCAN (Mapas de Canarias, Cartográfica de Canarias, S.A).

- Terreno desfavorable según CTE

En la Ilustración 1, se muestra que el terreno de esta parcela está clasificado como un terreno desfavorable, tipo T3 según el CTE. El sombreado blanco (Ilustración 1) muestra las zonas con terrenos desfavorables (T3).



Ilustración 1. Parcela clasificada como terreno desfavorable (Tipo T-3 según CTE). Fuente: GRAFCAN [6].

- Terreno clasificado como depósito antrópico

En la Ilustración 2, se muestra que el suelo de esta parcela está designado como depósito antrópico (zona sombreada en negro). En el siguiente apartado de este anexo, en el apartado 3.2., se pasará a describir esta tipología de suelos.



Ilustración 2. Litología de la parcela - Depósito antrópico. Fuente: GRAFCAN [6].

3.2. Litología de la parcela

Como se observa en la Ilustración 2, la parcela elegida está clasificada en el grupo de los Depósitos antrópicos. Estos son depósitos de naturaleza y granulometría diversas, preferentemente diferenciados cartográficamente en la mitad oriental (más poblada) de la isla, dada su asociación con la actividad constructiva y turística. Se trata de rellenos para la pista del aeropuerto, para infraestructuras viarias, polígonos industriales, etc. De todos ellos, los más importantes son los asociados con la construcción del aeropuerto y base militar de Gando [7].

De esta forma, se comprueba y se verifica que dicha parcela es un terreno de relleno, además, observando la vista desde la fachada de dicha parcela que da a la Avenida Finnair (Ilustración 3), queda claro que se trata de un suelo de relleno.



Ilustración 3. Parcela vista desde la fachada. Fuente: Google Maps [8].

3.2.1. Descripción de la litología

Los rellenos antrópicos son depósitos colocados por la acción del hombre, en general sin ningún tipo de control, de origen muy variado, debidos a movimientos de tierras asociados a la construcción de vías de comunicación, de edificaciones, de canteras tanto activas como abandonadas, explanadas para infraestructuras, etc. La naturaleza de estos depósitos es muy diversa y en ocasiones depende de la finalidad para la que fueron destinados. En términos generales se pueden asimilar a sedimentos heterométricos, con bolos y bloques angulosos a subangulosos y abundantes finos en la matriz (arenas y limos). En determinadas circunstancias pueden contener materiales de reciclaje y residuos de la actividad humana. Constituyen una de las amenazas más importantes para el buen comportamiento de las cimentaciones [9].

Se definen como terrenos blandos tipo T3, no aptos para cimentar edificios salvo que se realice las mejoras o refuerzos que incrementen sus propiedades, tal y como se establece en el Art. 8 del DB SE-C [9].

Los problemas geotécnicos más habituales de estas unidades son los siguientes [9]:

- Baja resistencia y elevada y muy elevada deformabilidad a corto y largo plazo.
- Debido a la elevada heterogeneidad que presentan, plantean un problema añadido a la hora de definir sus características geotécnicas. Su comportamiento es muy diferenciado y da lugar a asentos a largo plazo.
- Grados de compactación muy bajos o inexistentes.
- Riesgos de colapsos, combustión espontánea, emanación de gases, agresividad química, etc.

La cimentación sobre rellenos plantea problemas muy graves debido a la heterogeneidad que presentan. Cascotes de diferentes tamaños, montones de arenas y gravas, y residuos urbanos de diversa naturaleza se entremezclan sin obedecer a pautas fijas. Dicha heterogeneidad, implica que el reconocimiento geotécnico sea mucho más difícil y problemático que en el caso de terrenos naturales. En general, las normas y códigos prohíben o desaconsejan la cimentación sobre rellenos, cuando no se puedan evitar, se hace necesario un proceso previo de acondicionado y mejora del suelo [10].

A pesar de esto, dichos terrenos están siendo ocupados por viviendas unifamiliares, naves industriales, centros escolares, etc. Por lo que se hace necesario encontrar soluciones de cimentación no demasiado costosas. Entre las soluciones más frecuentes se encuentra la ejecución de pilotes, perforando a rotación con maquinaria especial, o la ejecución de numerosos micropilotes que tienen mayor facilidad para atravesar obstáculos [10].

3.3. Características de la zona y de la parcela

- Características de la zona

La parcela escogida se encuentra en un tejido urbano (Ilustración 4). El color rojo hace referencia a las zonas clasificadas como tejidos urbanos, la zona sombreada en blanco se refiere a instalaciones deportivas y recreativas.

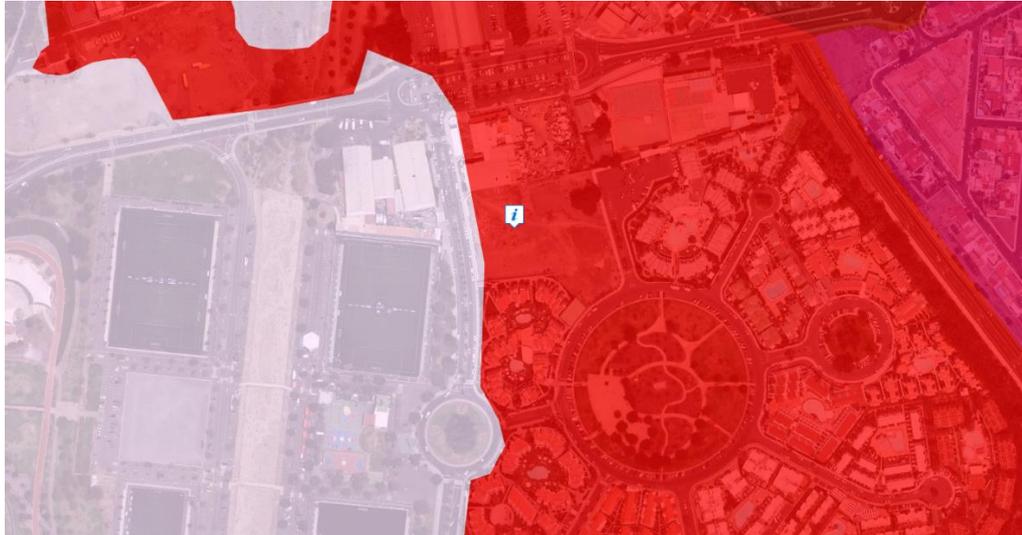


Ilustración 4. Parcela situada en zona urbana. Fuente: GRAFCAN [6]

- Características de la parcela

En la siguiente tabla (tabla 7), se muestran algunas características de la parcela escogida.

Superficie	7162,67 m ²
Coordenadas	X: 441615 Y: 3071350
Porcentaje máximo de ocupación (%)	40
Edificabilidad máxima (m ² e/m ² s)	0,60
Altura máxima en número de plantas	4
Separación mínima a lindero frontal, a lindero posterior y a lindero lateral (m)	3
Usos principales	Comunitario > Dotacional > Equipamientos > Social
Usos prohibidos	5.2.1: Terciario > Comercial > Locales comerciales 5.3.1: Terciario > Hostelería > Restaurantes 5.7: Terciario > Locales de espectáculos Observaciones - Salas de baile. 8.5.1: Infraestructuras > Aparcamientos y garajes > Aparcamientos y garajes públicos

Tabla 7. Características de la parcela [11].

3.4. Asignación de los parámetros elásticos a la parcela

Una vez definida la litología de la parcela y los rangos de valores de diferentes parámetros para los distintos tipos de suelo, se pasará a asignarle una serie de parámetros al terreno escogido, de manera que se adapte a su litología. Estos parámetros serán necesarios, pues son datos que habrá que proporcionar al programa de cálculo para poder analizar la mejora que experimentará el suelo al pilotarlo.

Al tratarse de un terreno de relleno, el terreno será blando y su composición granulométrica estará formada principalmente por bolos, gravas, arenas y limos. En función de esto y de los valores mostrados en las Tablas 1,2,3 y 6 de este Anexo, se tomarán los siguientes parámetros:

$$c_s = 80 \text{ m/s}; \nu(\text{coeficiente de Poisson}) = 0,3; \gamma(\text{peso específico}) = 18 \text{ kN/m}^3$$

Se escogió un valor pequeño para la velocidad de propagación de las ondas de cizalla del suelo (c_s), pues los terrenos de relleno son suelos bastante blandos. En cuanto al coeficiente de Poisson (ν), se escogió el valor típico de las arenas y suelos granulares (ver Tabla 2), pues la mayor parte de la composición de un terreno de relleno consta de gravas y arenas. Por último, en cuanto al valor del peso específico (γ) se tomó el valor típico de los terrenos de rellenos – pedraplén (ver Tabla 3), además, este valor (18 kN/m^3), se encuentra entre los rangos típicos de peso específico para terrenos compuestos por arenas limos y arcillas (ver Tabla 3), y se queda muy cerca de los valores típicos para gravas. No obstante, para dar seguridad a los parámetros elegidos se estudiará más adelante en este anexo (apartado 3.4.1.), cuánto varían los resultados de rigidización del suelo al cambiar el peso específico y el coeficiente de Poisson en unos valores cercanos que también podrían ser considerados.

Las demás propiedades elásticas del suelo, módulo de elasticidad longitudinal (E) y módulo de elasticidad transversal (G), se obtienen mediante las ecuaciones fundamentales de la elastodinámica (ρ hace referencia a la densidad del suelo):

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (\text{Ec. 2})$$

De esta forma, aplicando estas ecuaciones (Ec.1 y Ec.2), a las propiedades supuestas, se obtienen los siguientes resultados (Tabla 8):

Parámetros de la parcela	
c_s	80 m/s
ν	0,3
γ	18 kN/m ³
ρ	1800 kg/m ³
G	1,152 · 10 ⁷ N/m ²
E	2,9952 · 10 ⁷ N/m ²

Tabla 8. Parámetros elásticos de la parcela.

Atendiendo al valor que se obtiene para el módulo de elasticidad longitudinal, se obtiene un valor aproximado de 30 MN/m², observando los intervalos dados para este parámetro en la Tabla 1 del presente Anexo, se verifica que se está ante un suelo blando.

3.4.1. Comprobación en la sensibilidad de la toma de parámetros

En este apartado se realizará un análisis de sensibilidad del coeficiente de Poisson y la densidad del terreno, pues cuando se estiman las propiedades del suelo, lo más probable es que exista más de una opción elegible. En este caso, por ejemplo, se tomó un peso específico aparente de 18 kN/m³, no obstante, también se podría haber optado por coger 19 kN/m³, que es el peso específico aparente típico de los terrenos con gravas (ver de nuevo Tabla 3). Por este motivo, este apartado tratará de analizar los resultados de rigidización (ratio de desplazamientos del suelo sin pilotar con respecto a los desplazamientos del suelo armado), que se obtienen para dos suelos de idénticas propiedades, pero con una ligera diferencia entre las densidades y los coeficientes de Poisson elegidos. Con el objetivo de analizar de forma gráfica las diferencias relativas de los resultados que se obtienen entre un caso y el otro.

En la Ilustración 5, se muestran las diferencias obtenidas (en %) entre los ratios de desplazamientos (rigidizaciones), para dos suelos idénticos pero con distinta densidad, para todas las configuraciones estudiadas en el presente trabajo. Para un suelo se tomó un peso específico de 18 kN/m³ (densidad 1800 kg/m³, el correspondiente a terraplenes), y para el otro suelo se tomó un peso específico de 19 kN/m³ (densidad 1900 kg/m³, el correspondiente a terrenos compuestos principalmente por gravas). Como se observa (Ilustración 5), las diferencias obtenidas son totalmente despreciables, no llegan ni al 0,5%. Estas diferencias se calcularon con respecto al caso del suelo con densidad 1800 kg/m³ de acuerdo con la siguiente expresión (Ec. 3):

$$diferencia \rho = \frac{\left(\left(\frac{u_0}{u_p} \right)_{1800 \frac{kg}{m^3}} - \left(\frac{u_0}{u_p} \right)_{1900 \frac{kg}{m^3}} \right) \cdot 100}{\left(\frac{u_0}{u_p} \right)_{1800 \frac{kg}{m^3}}} \quad (Ec. 3)$$

Donde, como ya se explicó en el documento Estudio Paramétrico y de Aplicación:

- u_0 hace referencia a los desplazamientos que se obtienen en el suelo sin pilotes en el punto de estudio
- u_p hace referencia a los desplazamientos que se obtienen en el suelo armado en el punto de estudio

En la Ilustración 6, se muestran las diferencias obtenidas (en %) entre los ratios de desplazamientos (rigidizaciones), para dos suelos idénticos pero con distinto coeficiente de Poisson, para todas las configuraciones estudiadas en el presente trabajo. Para un suelo se tomó coeficiente de Poisson de 0,3 (el correspondiente a terrenos granulares y arenas), y para el otro suelo se tomó 0,4 (el correspondiente a arcillas blandas). Las diferencias obtenidas (Ilustración 6), en la mayoría de los casos no supera el 3%, sin embargo, las configuraciones con separación entre pilotes de 1 m, sí se obtienen diferencias mayores, aunque no llegan a superar el 8 %. Las diferencias para este caso se obtuvieron con la siguiente expresión (Ec. 4):

$$diferencia\ v = \frac{\left(\left(\frac{u_0}{u_p} \right)_{0,3} - \left(\frac{u_0}{u_p} \right)_{0,4} \right) \cdot 100}{\left(\frac{u_0}{u_p} \right)_{0,3}} \quad (Ec. 4)$$

De esta forma, con este análisis de sensibilidad que estudia pequeñas variaciones entre el coeficiente de Poisson y la densidad del terreno, se verifica que, considerando propiedades muy cercanas y parecidas entre sí, se obtienen resultados semejantes, lo que justifica y da seguridad acerca de las decisiones tomadas en la asignación de las propiedades del terreno.

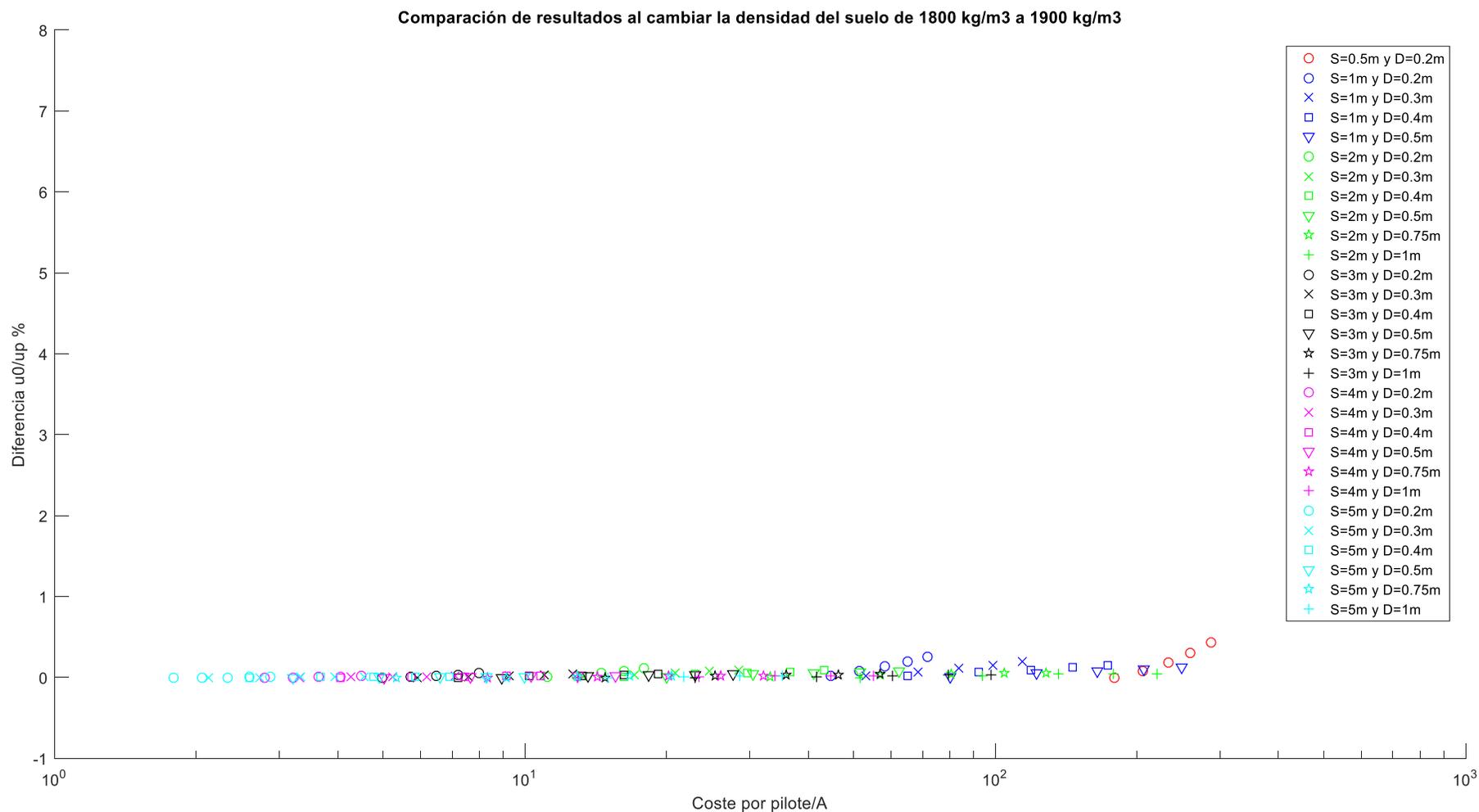


Ilustración 5. Diferencias en %, de las rigidizaciones obtenidas para dos suelos idénticos, pero con distinta densidad (1800-1900kg/m³).

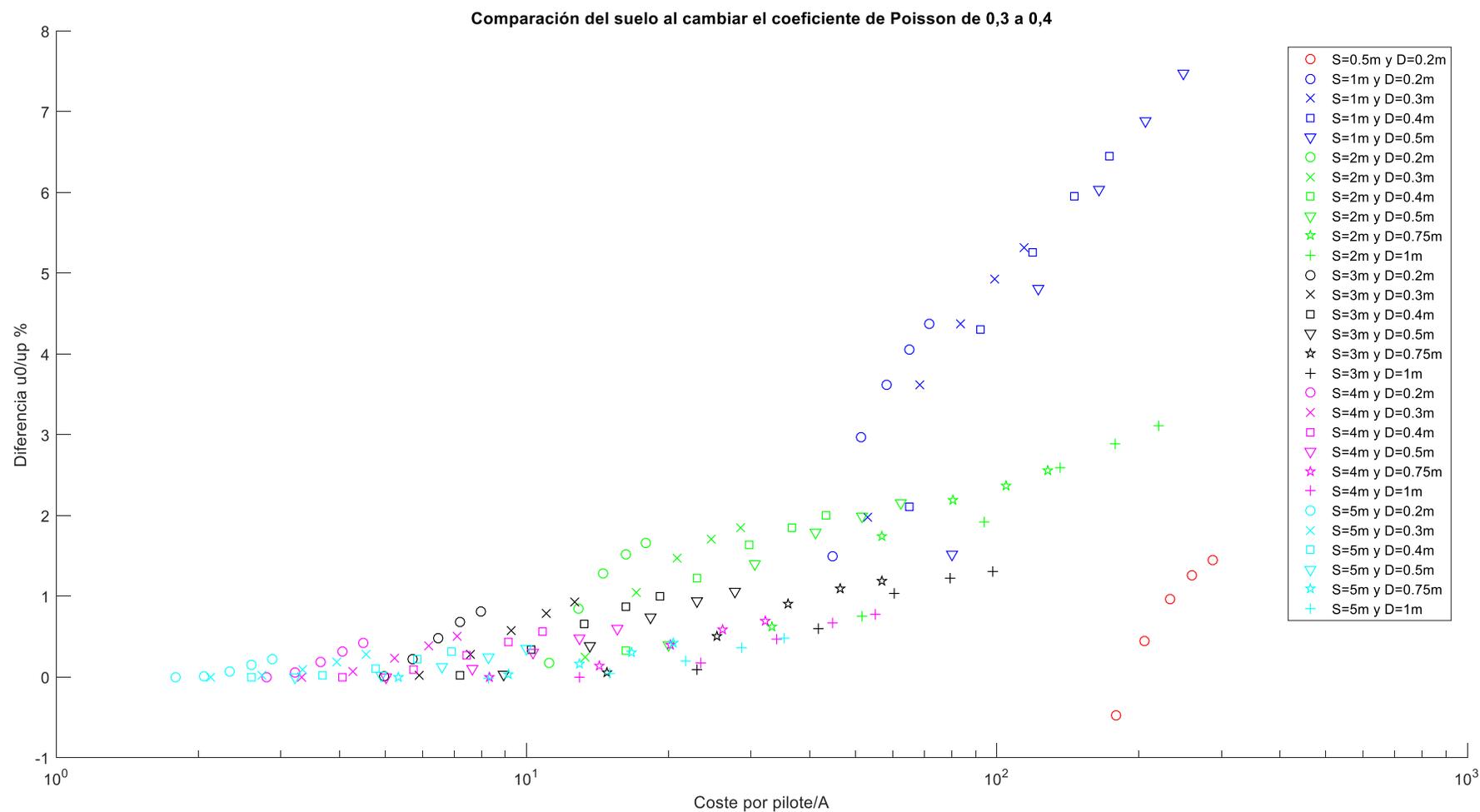


Ilustración 6. Diferencias en %, de las rigidizaciones obtenidas para dos suelos idénticos, pero con distinto coeficiente de Poisson (0,3-0,4).

4. Referencias

- [1] – Apuntes de la asignatura “Construcción y arquitectura industrial”, tema “El terreno” impartida en la Escuela de Ingenieros Industriales y Civiles de la ULPGC (EIIC).
- [2] – CTE. Código Técnico de la Edificación, en su documento básico: DB-SE-C, Documento Básico, Seguridad Estructural, Cimientos.
- [3] – Rodríguez Segurado, M. (2005). Caracterización de la Respuesta Sísmica de los Suelos. Aplicación a la ciudad de Barcelona.
- [4] – RUEDA NÚÑEZ, J. J. (2015). *Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía* (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid).
- [5] – Álvarez, S. (1999). El efecto local sobre el movimiento sísmico del suelo: Fenomenología y resultados recientes. *Física de la Tierra*, 11, 141-173.
- [6] – GRAFCAN, visor. Disponible en: <https://www.grafcan.es/>. Último acceso en marzo de 2020.
- [7] – Sistema de información territorial de Canarias – IDECanarias, <https://visor.grafcan.es/visorweb/>. Mapa Geológico. (año 2010). Descripción de las unidades geológicas de Gran Canaria, código 109. Consultado el 26 de marzo de 2020, en https://www.idecanarias.es/resources/GEOLOGICO/GC_LITO_unidades_geologicas.pdf
- [8] – Google Maps. Disponible en: <https://www.google.es/maps>. Último acceso en marzo de 2020.
- [9] – Gobierno de Canarias. (2011). Guía para la planificación y realización de estudios geotécnicos para la edificación en la comunidad autónoma de Canarias. GETCAN-011.
- [10] – Lomoschitz, A. (1996). Caracterización geotécnica del terreno, con ejemplos de Gran Canaria y Tenerife.
- [11] – Ayuntamiento de San Bartolomé de Tirajana. (2020). Consulta de planeamiento. Consultado el 18 de marzo de 2020, en <https://asptf.grafcan.es/wsBDPout/uomhye45pj2bcj45wujir0et.pdf>

ANEXO II: RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE SUELOS ARMADOS CON TÉCNICA DE PILOTAJE.
APLICACIÓN EN TERRENOS DE RELLENO EN GRAN CANARIA.

ÍNDICE

1. Resultados del estudio paramétrico	1
1.1. Resultados para Cs=80 m/s	1
1.2. Resultados para Cs=120 m/s	4
1.3. Resultados para Cs=160 m/s	7
2. Resultados para el estudio práctico	11

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados del estudio paramétrico, $C_s=80$ m/s.....	1
Tabla 2. Resultados del estudio paramétrico, $C_s=120$ m/s.....	4
Tabla 3. Resultados del estudio paramétrico, $C_s=160$ m/s.....	7
Tabla 4. Resultados del estudio de aplicación.	11

1. Resultados del estudio paramétrico

1.1. Resultados para $C_s=80$ m/s

Tabla 1. Resultados del estudio paramétrico, $C_s=80$ m/s.

D (m)	L (m)	S (m)	Vh (m ³)	Coste por pilote (€)	u ₀ /u _p	Vh/A (m)	Coste por pilote / A (€/m ²)
0,2	2	0,5	0,063	45,07	1,178	0,251	180,29
		1			1,059	0,063	45,07
		2			1,005	0,016	11,27
		3			1,001	0,007	5,01
		4			1,000	0,004	2,82
		5			1,000	0,003	1,80
	4	0,5	0,126	52,21	1,714	0,503	208,86
		1			1,256	0,126	52,21
		2			1,033	0,031	13,05
		3			1,005	0,014	5,80
		4			1,001	0,008	3,26
		5			1,000	0,005	2,09
	6	0,5	0,188	59,35	2,127	0,754	237,42
		1			1,397	0,188	59,35
		2			1,073	0,047	14,84
		3			1,018	0,021	6,59
		4			1,005	0,012	3,71
		5			1,001	0,008	2,37
	8	0,5	0,251	66,50	2,464	1,005	265,98
		1			1,492	0,251	66,50
		2			1,106	0,063	16,62
		3			1,032	0,028	7,39
		4			1,011	0,016	4,16
		5			1,004	0,010	2,66
	10	0,5	0,314	73,64	2,741	1,257	294,55
1		1,560			0,314	73,64	
2		1,130			0,079	18,41	
3		1,045			0,035	8,18	
4		1,018			0,020	4,60	
5		1,008			0,013	2,95	
0,3	2	1	0,141	54,00	1,085	0,141	54,00
		2			1,009	0,035	13,50
		3			1,002	0,016	6,00
		4			1,000	0,009	3,37
		5			1,000	0,006	2,16
	4	1	0,283	70,07	1,320	0,283	70,07
		2			1,049	0,071	17,52
		3			1,009	0,031	7,79

		4			1,002	0,018	4,38
		5			1,001	0,011	2,80
	6	1	0,424	86,13	1,483	0,424	86,13
		2			1,097	0,106	21,53
		3			1,025	0,047	9,57
		4			1,007	0,027	5,38
		5			1,002	0,017	3,45
	8	1	0,565	102,20	1,597	0,565	102,20
		2			1,136	0,141	25,55
		3			1,043	0,063	11,36
		4			1,015	0,035	6,39
		5			1,006	0,023	4,09
	10	1	0,707	118,27	1,682	0,707	118,27
		2			1,165	0,177	29,57
		3			1,058	0,079	13,14
4		1,024			0,044	7,39	
5		1,010			0,028	4,73	
0,4	2	1	0,251	66,50	1,116	0,251	66,50
		2			1,013	0,063	16,62
		3			1,002	0,028	7,39
		4			1,001	0,016	4,16
		5			1,000	0,010	2,66
	4	1	0,503	95,06	1,376	0,503	95,06
		2			1,066	0,126	23,76
		3			1,014	0,056	10,56
		4			1,004	0,031	5,94
		5			1,001	0,020	3,80
	6	1	0,754	123,62	1,553	0,754	123,62
		2			1,121	0,188	30,91
		3			1,033	0,084	13,74
		4			1,010	0,047	7,73
		5			1,003	0,030	4,94
	8	1	1,005	152,19	1,679	1,005	152,19
		2			1,165	0,251	38,05
		3			1,053	0,112	16,91
		4			1,019	0,063	9,51
		5			1,007	0,040	6,09
10	1	1,257	180,75	1,777	1,257	180,75	
	2			1,197	0,314	45,19	
	3			1,071	0,140	20,08	
	4			1,029	0,079	11,30	
	5			1,013	0,050	7,23	
0,5	2	1	0,393	82,56	1,151	0,393	82,56
		2			1,018	0,098	20,64
		3			1,003	0,044	9,17
		4			1,001	0,025	5,16

		5			1,000	0,016	3,30
	4	1	0,785	127,19	1,425	0,785	127,19
		2			1,084	0,196	31,80
		3			1,019	0,087	14,13
		4			1,005	0,049	7,95
		5			1,002	0,031	5,09
	6	1	1,178	171,82	1,612	1,178	171,82
		2			1,145	0,295	42,96
		3			1,041	0,131	19,09
		4			1,013	0,074	10,74
		5			1,005	0,047	6,87
	8	1	1,571	216,45	1,748	1,571	216,45
		2			1,192	0,393	54,11
		3			1,064	0,175	24,05
		4			1,024	0,098	13,53
		5			1,009	0,063	8,66
	10	1	1,963	261,08	1,855	1,963	261,08
		2			1,226	0,491	65,27
		3			1,083	0,218	29,01
		4			1,035	0,123	16,32
		5			1,015	0,079	10,44
0,75	2	2	0,884	138,35	1,026	0,221	34,59
		3			1,004	0,098	15,37
		4			1,001	0,055	8,65
		5			1,000	0,035	5,53
	4	2	1,767	238,77	1,131	0,442	59,69
		3			1,033	0,196	26,53
		4			1,010	0,110	14,92
		5			1,004	0,071	9,55
	6	2	2,651	339,19	1,203	0,663	84,80
		3			1,063	0,295	37,69
		4			1,022	0,166	21,20
		5			1,009	0,106	13,57
	8	2	3,534	439,60	1,257	0,884	109,90
		3			1,090	0,393	48,84
		4			1,036	0,221	27,48
		5			1,015	0,141	17,58
	10	2	4,418	540,02	1,294	1,104	135,01
		3			1,112	0,491	60,00
		4			1,049	0,276	33,75
		5			1,023	0,177	21,60
1	2	2	1,571	216,45	1,044	0,393	54,11
		3			1,007	0,175	24,05
		4			1,002	0,098	13,53
		5			1,001	0,063	8,66
	4	2	3,142	394,97	1,183	0,785	98,74

		3			1,048	0,349	43,89
		4			1,015	0,196	24,69
		5			1,005	0,126	15,80
	6	2	4,712	573,50	1,265	1,178	143,37
		3			1,087	0,524	63,72
		4			1,032	0,295	35,84
		5			1,013	0,188	22,94
	8	2	6,283	752,02	1,320	1,571	188,00
		3			1,116	0,698	83,56
		4			1,048	0,393	47,00
		5			1,022	0,251	30,08
	10	2	7,854	930,54	1,362	1,963	232,63
		3			1,140	0,873	103,39
		4			1,063	0,491	58,16
		5			1,031	0,314	37,22

1.2. Resultados para $C_s=120$ m/s

Tabla 2. Resultados del estudio paramétrico, $C_s=120$ m/s.

D (m)	L (m)	S (m)	Vh (m ³)	Coste por pilote (€)	u ₀ /u _p	Vh/A (m)	Coste por pilote / A (€/m ²)
0,2	2	0,5	0,063	45,07	1,181	0,251	180,29
		1			1,056	0,063	45,07
		2			1,003	0,016	11,27
		3			1,000	0,007	5,01
		4			1,000	0,004	2,82
		5			1,000	0,003	1,80
	4	0,5	0,126	52,21	1,687	0,503	208,86
		1			1,240	0,126	52,21
		2			1,030	0,031	13,05
		3			1,005	0,014	5,80
		4			1,001	0,008	3,26
		5			1,000	0,005	2,09
	6	0,5	0,188	59,35	2,046	0,754	237,42
		1			1,362	0,188	59,35
		2			1,064	0,047	14,84
		3			1,015	0,021	6,59
		4			1,004	0,012	3,71
		5			1,001	0,008	2,37
	8	0,5	0,251	66,50	2,313	1,005	265,98
		1			1,438	0,251	66,50
2		1,090			0,063	16,62	
3		1,027			0,028	7,39	

		4	0,314	73,64	1,009	0,016	4,16			
		5			1,003	0,010	2,66			
	10	0,5			0,314	73,64	2,519	1,257	294,55	
		1					1,489	0,314	73,64	
		2					1,108	0,079	18,41	
		3					1,036	0,035	8,18	
		4					1,014	0,020	4,60	
	5	1,006			0,013	2,95				
	0,3	2			1	0,141	54,00	1,082	0,141	54,00
					2			1,007	0,035	13,50
3			1,001	0,016	6,00					
4			1,000	0,009	3,37					
5			1,000	0,006	2,16					
4		1	0,283	70,07	1,306	0,283	70,07			
		2			1,043	0,071	17,52			
		3			1,007	0,031	7,79			
		4			1,001	0,018	4,38			
		5			1,000	0,011	2,80			
6		1	0,424	86,13	1,455	0,424	86,13			
		2			1,088	0,106	21,53			
		3			1,022	0,047	9,57			
		4			1,006	0,027	5,38			
		5			1,002	0,017	3,45			
8		1	0,565	102,20	1,555	0,565	102,20			
		2			1,122	0,141	25,55			
		3			1,037	0,063	11,36			
		4			1,013	0,035	6,39			
		5			1,005	0,023	4,09			
10	1	0,707	118,27	1,627	0,707	118,27				
	2			1,146	0,177	29,57				
	3			1,051	0,079	13,14				
	4			1,020	0,044	7,39				
	5			1,009	0,028	4,73				
0,4	2	1	0,251	66,50	1,113	0,251	66,50			
		2			1,012	0,063	16,62			
		3			1,002	0,028	7,39			
		4			1,000	0,016	4,16			
		5			1,000	0,010	2,66			
	4	1	0,503	95,06	1,365	0,503	95,06			
		2			1,059	0,126	23,76			
		3			1,011	0,056	10,56			
		4			1,003	0,031	5,94			
		5			1,001	0,020	3,80			
	6	1	0,754	123,62	1,532	0,754	123,62			
		2			1,111	0,188	30,91			
		3			1,029	0,084	13,74			

		4			1,008	0,047	7,73	
		5			1,003	0,030	4,94	
	8		1	1,005	152,19	1,648	1,005	152,19
			2			1,151	0,251	38,05
			3			1,048	0,112	16,91
			4			1,017	0,063	9,51
			5			1,006	0,040	6,09
	10		1	1,257	180,75	1,734	1,257	180,75
			2			1,179	0,314	45,19
			3			1,063	0,140	20,08
4			1,026			0,079	11,30	
5			1,011			0,050	7,23	
0,5	2	1	0,393	82,56	1,148	0,393	82,56	
		2			1,016	0,098	20,64	
		3			1,003	0,044	9,17	
		4			1,001	0,025	5,16	
		5			1,000	0,016	3,30	
	4	1	0,785	127,19	1,418	0,785	127,19	
		2			1,076	0,196	31,80	
		3			1,016	0,087	14,13	
		4			1,004	0,049	7,95	
		5			1,001	0,031	5,09	
	6	1	1,178	171,82	1,597	1,178	171,82	
		2			1,135	0,295	42,96	
		3			1,037	0,131	19,09	
		4			1,011	0,074	10,74	
		5			1,004	0,047	6,87	
	8	1	1,571	216,45	1,725	1,571	216,45	
		2			1,178	0,393	54,11	
		3			1,058	0,175	24,05	
		4			1,021	0,098	13,53	
		5			1,008	0,063	8,66	
10	1	1,963	261,08	1,823	1,963	261,08		
	2			1,209	0,491	65,27		
	3			1,075	0,218	29,01		
	4			1,031	0,123	16,32		
	5			1,014	0,079	10,44		
0,75	2	2	0,884	138,35	1,025	0,221	34,59	
		3			1,004	0,098	15,37	
		4			1,001	0,055	8,65	
		5			1,000	0,035	5,53	
	4	2	1,767	238,77	1,124	0,442	59,69	
		3			1,030	0,196	26,53	
		4			1,009	0,110	14,92	
		5			1,003	0,071	9,55	
	6	2	2,651	339,19	1,194	0,663	84,80	

		3			1,058	0,295	37,69	
		4			1,019	0,166	21,20	
		5			1,007	0,106	13,57	
	8	3,534	439,60	2	1,245	0,884	109,90	
				3	1,084	0,393	48,84	
				4	1,032	0,221	27,48	
				5	1,013	0,141	17,58	
	10	4,418	540,02	2	1,280	1,104	135,01	
				3	1,105	0,491	60,00	
				4	1,045	0,276	33,75	
				5	1,020	0,177	21,60	
	1	2	1,571	216,45	2	1,043	0,393	54,11
					3	1,007	0,175	24,05
					4	1,002	0,098	13,53
					5	1,001	0,063	8,66
		4	3,142	394,97	2	1,177	0,785	98,74
3					1,046	0,349	43,89	
4					1,014	0,196	24,69	
5					1,005	0,126	15,80	
6		4,712	573,50	2	1,257	1,178	143,37	
				3	1,081	0,524	63,72	
				4	1,029	0,295	35,84	
				5	1,012	0,188	22,94	
8		6,283	752,02	2	1,311	1,571	188,00	
				3	1,111	0,698	83,56	
				4	1,045	0,393	47,00	
				5	1,019	0,251	30,08	
10		7,854	930,54	2	1,351	1,963	232,63	
				3	1,134	0,873	103,39	
				4	1,059	0,491	58,16	
				5	1,028	0,314	37,22	

1.3. Resultados para Cs=160 m/s

Tabla 3. Resultados del estudio paramétrico, Cs=160 m/s.

D (m)	L (m)	S (m)	Vh (m ³)	Coste por pilote (€)	u0/up	Vh/A (m)	Coste por pilote / A (€/m ²)
0,2	2	0,5	0,063	45,07	1,179	0,251	180,29
		1			1,054	0,063	45,07
		2			1,003	0,016	11,27
		3			1,000	0,007	5,01
		4			1,000	0,004	2,82
		5			1,000	0,003	1,80
	4	0,5	0,126	52,21	1,645	0,503	208,86

		1			1,222	0,126	52,21
		2			1,027	0,031	13,05
		3			1,004	0,014	5,80
		4			1,001	0,008	3,26
		5			1,000	0,005	2,09
	6	0,5	0,188	59,35	1,945	0,754	237,42
		1			1,324	0,188	59,35
		2			1,056	0,047	14,84
		3			1,013	0,021	6,59
		4			1,004	0,012	3,71
		5			1,001	0,008	2,37
	8	0,5	0,251	66,50	2,152	1,005	265,98
		1			1,383	0,251	66,50
		2			1,075	0,063	16,62
		3			1,022	0,028	7,39
		4			1,008	0,016	4,16
		5			1,003	0,010	2,66
	10	0,5	0,314	73,64	2,301	1,257	294,55
		1			1,421	0,314	73,64
		2			1,088	0,079	18,41
3		1,028			0,035	8,18	
4		1,011			0,020	4,60	
5		1,005			0,013	2,95	
0,3	2	1	0,141	54,00	1,079	0,141	54,00
		2			1,006	0,035	13,50
		3			1,001	0,016	6,00
		4			1,000	0,009	3,37
		5			1,000	0,006	2,16
	4	1	0,283	70,07	1,291	0,283	70,07
		2			1,040	0,071	17,52
		3			1,006	0,031	7,79
		4			1,001	0,018	4,38
		5			1,000	0,011	2,80
	6	1	0,424	86,13	1,425	0,424	86,13
		2			1,079	0,106	21,53
		3			1,020	0,047	9,57
		4			1,005	0,027	5,38
		5			1,002	0,017	3,45
	8	1	0,565	102,20	1,510	0,565	102,20
		2			1,108	0,141	25,55
		3			1,033	0,063	11,36
		4			1,011	0,035	6,39
		5			1,004	0,023	4,09
10	1	0,707	118,27	1,568	0,707	118,27	
	2			1,128	0,177	29,57	
	3			1,043	0,079	13,14	

		4			1,017	0,044	7,39
		5			1,007	0,028	4,73
0,4	2	1	0,251	66,50	1,110	0,251	66,50
		2			1,011	0,063	16,62
		3			1,002	0,028	7,39
		4			1,000	0,016	4,16
		5			1,000	0,010	2,66
	4	1	0,503	95,06	1,352	0,503	95,06
		2			1,054	0,126	23,76
		3			1,010	0,056	10,56
		4			1,002	0,031	5,94
		5			1,001	0,020	3,80
	6	1	0,754	123,62	1,506	0,754	123,62
		2			1,102	0,188	30,91
		3			1,026	0,084	13,74
		4			1,007	0,047	7,73
		5			1,002	0,030	4,94
	8	1	1,005	152,19	1,609	1,005	152,19
		2			1,137	0,251	38,05
		3			1,043	0,112	16,91
		4			1,015	0,063	9,51
		5			1,006	0,040	6,09
10	1	1,257	180,75	1,684	1,257	180,75	
	2			1,161	0,314	45,19	
	3			1,056	0,140	20,08	
	4			1,023	0,079	11,30	
	5			1,010	0,050	7,23	
0,5	2	1	0,393	82,56	1,145	0,393	82,56
		2			1,015	0,098	20,64
		3			1,003	0,044	9,17
		4			1,001	0,025	5,16
		5			1,000	0,016	3,30
	4	1	0,785	127,19	1,407	0,785	127,19
		2			1,070	0,196	31,80
		3			1,014	0,087	14,13
		4			1,003	0,049	7,95
		5			1,001	0,031	5,09
	6	1	1,178	171,82	1,575	1,178	171,82
		2			1,125	0,295	42,96
		3			1,033	0,131	19,09
		4			1,010	0,074	10,74
		5			1,003	0,047	6,87
	8	1	1,571	216,45	1,693	1,571	216,45
		2			1,164	0,393	54,11
		3			1,052	0,175	24,05
		4			1,019	0,098	13,53

		5			1,007	0,063	8,66
	10	1	1,963	261,08	1,780	1,963	261,08
		2			1,192	0,491	65,27
		3			1,068	0,218	29,01
		4			1,028	0,123	16,32
		5			1,012	0,079	10,44
0,75	2	2	0,884	138,35	1,024	0,221	34,59
		3			1,004	0,098	15,37
		4			1,001	0,055	8,65
		5			1,000	0,035	5,53
	4	2	1,767	238,77	1,116	0,442	59,69
		3			1,027	0,196	26,53
		4			1,008	0,110	14,92
		5			1,003	0,071	9,55
	6	2	2,651	339,19	1,184	0,663	84,80
		3			1,053	0,295	37,69
		4			1,017	0,166	21,20
		5			1,006	0,106	13,57
	8	2	3,534	439,60	1,232	0,884	109,90
		3			1,078	0,393	48,84
		4			1,029	0,221	27,48
		5			1,012	0,141	17,58
	10	2	4,418	540,02	1,265	1,104	135,01
		3			1,097	0,491	60,00
		4			1,041	0,276	33,75
		5			1,018	0,177	21,60
1	2	2	1,571	216,45	1,042	0,393	54,11
		3			1,007	0,175	24,05
		4			1,002	0,098	13,53
		5			1,000	0,063	8,66
	4	2	3,142	394,97	1,170	0,785	98,74
		3			1,043	0,349	43,89
		4			1,013	0,196	24,69
		5			1,004	0,126	15,80
	6	2	4,712	573,50	1,247	1,178	143,37
		3			1,076	0,524	63,72
		4			1,027	0,295	35,84
		5			1,010	0,188	22,94
	8	2	6,283	752,02	1,300	1,571	188,00
		3			1,105	0,698	83,56
		4			1,041	0,393	47,00
		5			1,017	0,251	30,08
	10	2	7,854	930,54	1,337	1,963	232,63
		3			1,126	0,873	103,39
		4			1,055	0,491	58,16
		5			1,025	0,314	37,22

2. Resultados para el estudio práctico

Tabla 4. Resultados del estudio de aplicación.

D (m)	L (m)	S (m)	Vh (m ³)	Coste por pilote (€)	u0/up	Vh/A (m)	Coste por pilote / A (€/m ²)
0,2	2	0,5	0,063	45,07	1,173	0,251	180,29
		1			1,075	0,063	45,07
		2			1,006	0,016	11,27
		3			1,001	0,007	5,01
		4			1,000	0,004	2,82
		5			1,000	0,003	1,80
	4	0,5	0,126	52,21	1,722	0,503	208,86
		1			1,294	0,126	52,21
		2			1,042	0,031	13,05
		3			1,007	0,014	5,80
		4			1,001	0,008	3,26
		5			1,000	0,005	2,09
	6	0,5	0,188	59,35	2,148	0,754	237,42
		1			1,450	0,188	59,35
		2			1,087	0,047	14,84
		3			1,023	0,021	6,59
		4			1,007	0,012	3,71
		5			1,002	0,008	2,37
	8	0,5	0,251	66,50	2,495	1,005	265,98
		1			1,555	0,251	66,50
		2			1,123	0,063	16,62
		3			1,039	0,028	7,39
		4			1,014	0,016	4,16
		5			1,006	0,010	2,66
	10	0,5	0,314	73,64	2,781	1,257	294,55
1		1,631			0,314	73,64	
2		1,149			0,079	18,41	
3		1,053			0,035	8,18	
4		1,022			0,020	4,60	
5		1,010			0,013	2,95	
0,3	2	1	0,141	54,00	1,107	0,141	54,00
		2			1,011	0,035	13,50
		3			1,002	0,016	6,00
		4			1,000	0,009	3,37
		5			1,000	0,006	2,16
	4	1	0,283	70,07	1,369	0,283	70,07
		2			1,060	0,071	17,52
		3			1,012	0,031	7,79
		4			1,003	0,018	4,38
		5			1,001	0,011	2,80

	6	1	0,424	86,13	1,551	0,424	86,13
		2			1,114	0,106	21,53
		3			1,031	0,047	9,57
		4			1,009	0,027	5,38
		5			1,003	0,017	3,45
	8	1	0,565	102,20	1,679	0,565	102,20
		2			1,156	0,141	25,55
		3			1,051	0,063	11,36
		4			1,019	0,035	6,39
		5			1,007	0,023	4,09
	10	1	0,707	118,27	1,777	0,707	118,27
		2			1,187	0,177	29,57
		3			1,068	0,079	13,14
		4			1,029	0,044	7,39
		5			1,013	0,028	4,73
0,4	2	1	0,251	66,50	1,140	0,251	66,50
		2			1,017	0,063	16,62
		3			1,003	0,028	7,39
		4			1,001	0,016	4,16
		5			1,000	0,010	2,66
	4	1	0,503	95,06	1,437	0,503	95,06
		2			1,079	0,126	23,76
		3			1,017	0,056	10,56
		4			1,004	0,031	5,94
		5			1,001	0,020	3,80
	6	1	0,754	123,62	1,639	0,754	123,62
		2			1,140	0,188	30,91
		3			1,039	0,084	13,74
		4			1,012	0,047	7,73
		5			1,004	0,030	4,94
	8	1	1,005	152,19	1,786	1,005	152,19
		2			1,187	0,251	38,05
		3			1,062	0,112	16,91
		4			1,023	0,063	9,51
		5			1,009	0,040	6,09
10	1	1,257	180,75	1,899	1,257	180,75	
	2			1,221	0,314	45,19	
	3			1,082	0,140	20,08	
	4			1,035	0,079	11,30	
	5			1,016	0,050	7,23	
0,5	2	1	0,393	82,56	1,169	0,393	82,56
		2			1,022	0,098	20,64
		3			1,003	0,044	9,17
		4			1,001	0,025	5,16
		5			1,000	0,016	3,30
	4	1	0,785	127,19	1,497	0,785	127,19

		2			1,099	0,196	31,80	
		3			1,023	0,087	14,13	
		4			1,006	0,049	7,95	
		5			1,002	0,031	5,09	
	6		1	1,178	171,82	1,716	1,178	171,82
			2			1,166	0,295	42,96
			3			1,049	0,131	19,09
			4			1,016	0,074	10,74
			5			1,006	0,047	6,87
	8		1	1,571	216,45	1,878	1,571	216,45
			2			1,216	0,393	54,11
			3			1,074	0,175	24,05
			4			1,028	0,098	13,53
			5			1,012	0,063	8,66
	10		1	1,963	261,08	2,005	1,963	261,08
			2			1,253	0,491	65,27
3			1,095			0,218	29,01	
4			1,041			0,123	16,32	
5			1,019			0,079	10,44	
0,75	2	2	0,884	138,35	1,032	0,221	34,59	
		3			1,005	0,098	15,37	
		4			1,001	0,055	8,65	
		5			1,000	0,035	5,53	
	4	2	1,767	238,77	1,151	0,442	59,69	
		3			1,039	0,196	26,53	
		4			1,011	0,110	14,92	
		5			1,004	0,071	9,55	
	6	2	2,651	339,19	1,230	0,663	84,80	
		3			1,073	0,295	37,69	
		4			1,026	0,166	21,20	
		5			1,010	0,106	13,57	
	8	2	3,534	439,60	1,287	0,884	109,90	
		3			1,102	0,393	48,84	
		4			1,042	0,221	27,48	
		5			1,018	0,141	17,58	
	10	2	4,418	540,02	1,328	1,104	135,01	
		3			1,126	0,491	60,00	
		4			1,056	0,276	33,75	
		5			1,027	0,177	21,60	
1	2	2	1,571	216,45	1,051	0,393	54,11	
		3			1,008	0,175	24,05	
		4			1,002	0,098	13,53	
		5			1,000	0,063	8,66	
	4	2	3,142	394,97	1,207	0,785	98,74	
		3			1,055	0,349	43,89	
		4			1,017	0,196	24,69	

		5			1,006	0,126	15,80
	6	2	4,712	573,50	1,298	1,178	143,37
		3			1,098	0,524	63,72
		4			1,037	0,295	35,84
		5			1,015	0,188	22,94
		2			6,283	752,02	1,360
	3	1,130	0,698	83,56			
	4	1,056	0,393	47,00			
	5	1,026	0,251	30,08			
	10	2	7,854	930,54	1,406	1,963	232,63
		3			1,155	0,873	103,39
		4			1,072	0,491	58,16
		5			1,036	0,314	37,22

PLANOS DE LAS CONFIGURACIONES ESTUDIADAS

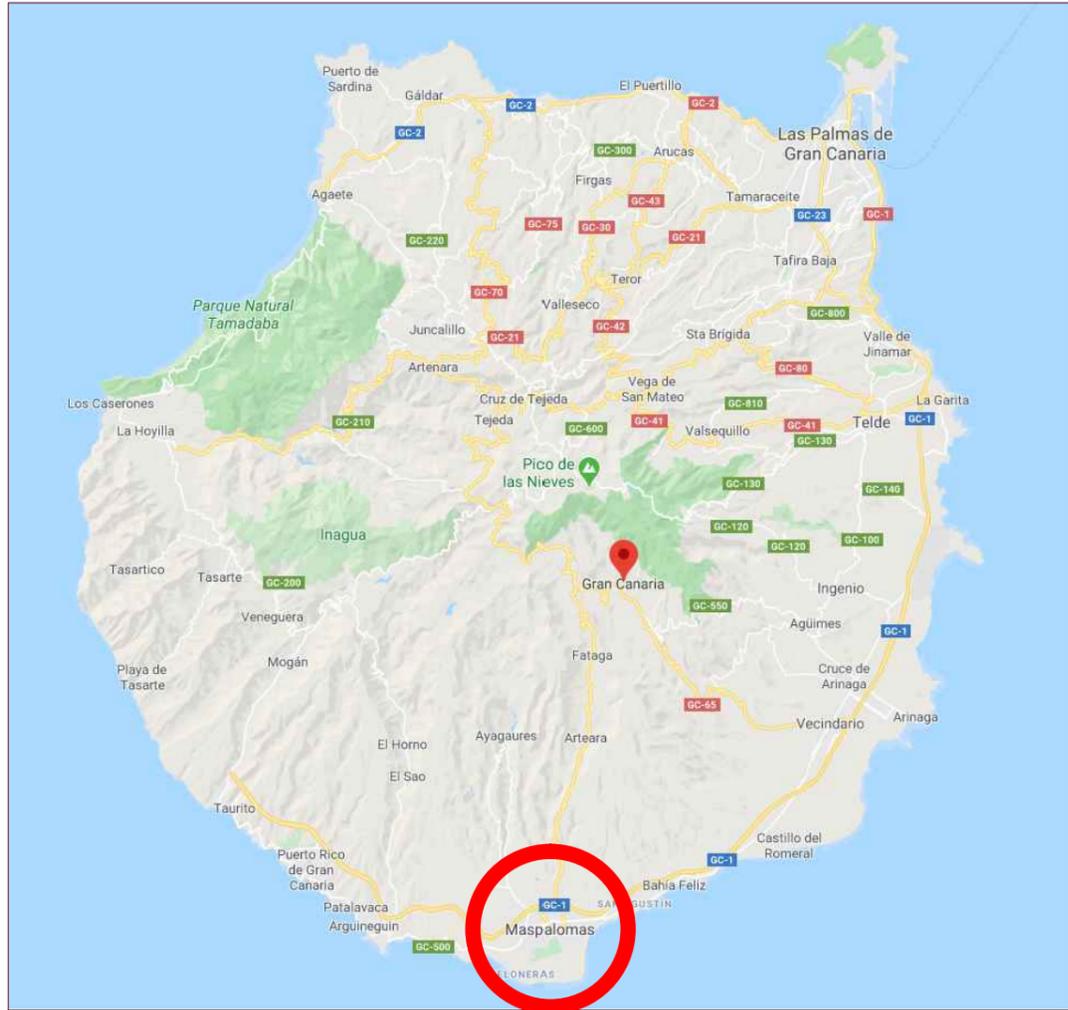
ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE SUELOS ARMADOS CON TÉCNICA DE PILOTAJE.
APLICACIÓN EN TERRENOS DE RELLENO EN GRAN CANARIA.

ÍNDICE

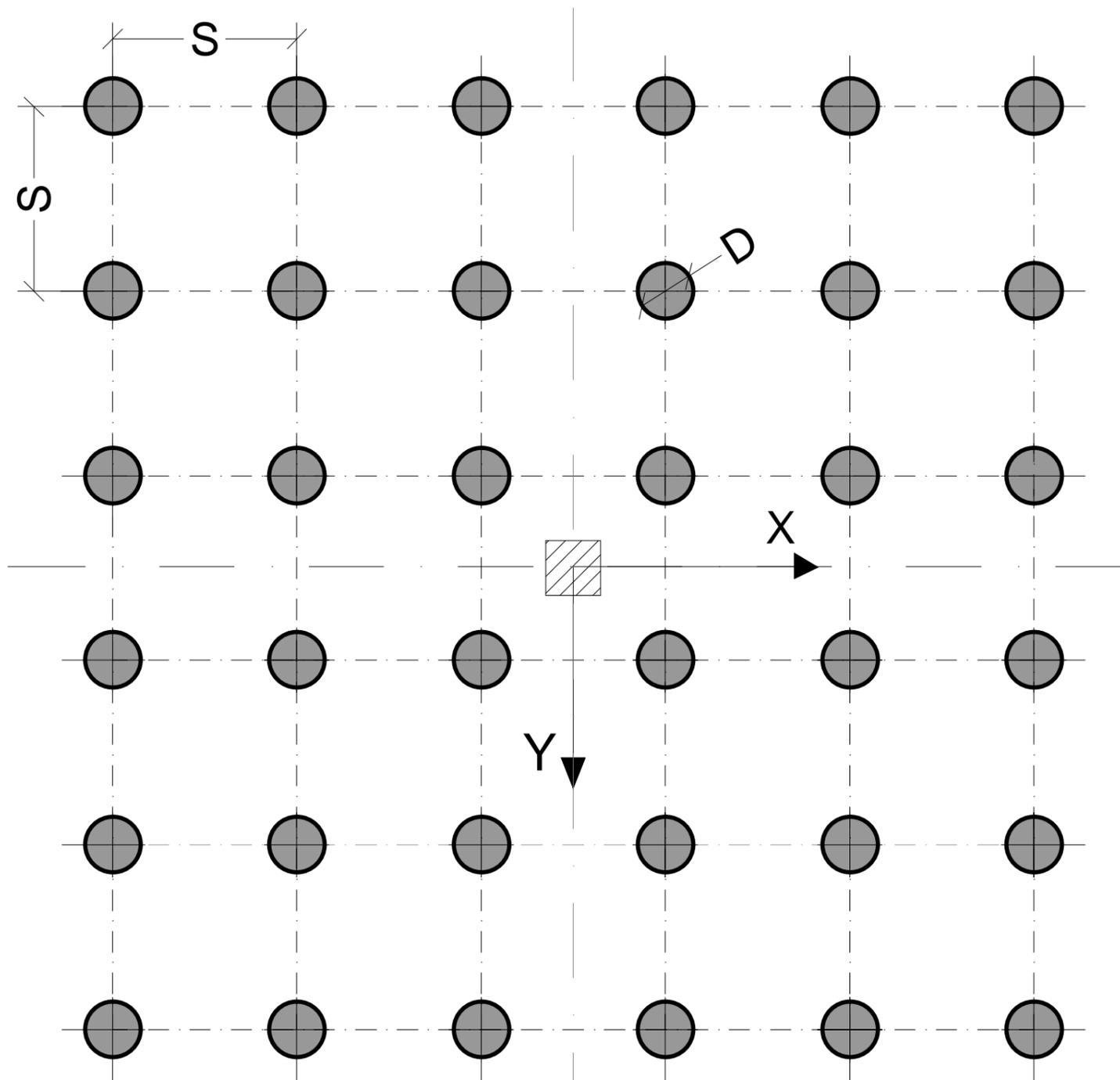
PLANO 1: SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO.

PLANO 2: VISTA EN PLANTA DE LA CONFIGURACIÓN DE PILOTES ESTUDIADA.

PLANO 3: VISTA EN ALZADO/PERFIL DE LA CONFIGURACIÓN DE PILOTES ESTUDIADA.



PROYECTO	ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL SUELOS ARMADOS CON TÉCNICA DE PILOTAJE. APLICACIÓN EN TERRENOS DE RELLENO EN GRAN CANARIA.			
PETICIONARIO	ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES Y CIVILES DE LA ULPGC			
EMPLAZAMIENTO	AVENIDA FINNAIR, SAN BARTOLOMÉ DE TIRAJANA, GRAN CANARIA			
PLANO	SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO			
Escala:	Autor: Eduardo Rodríguez Galván	Firma:	Fecha de edición: 21/04/2020 Formato: A3	Nº: 1

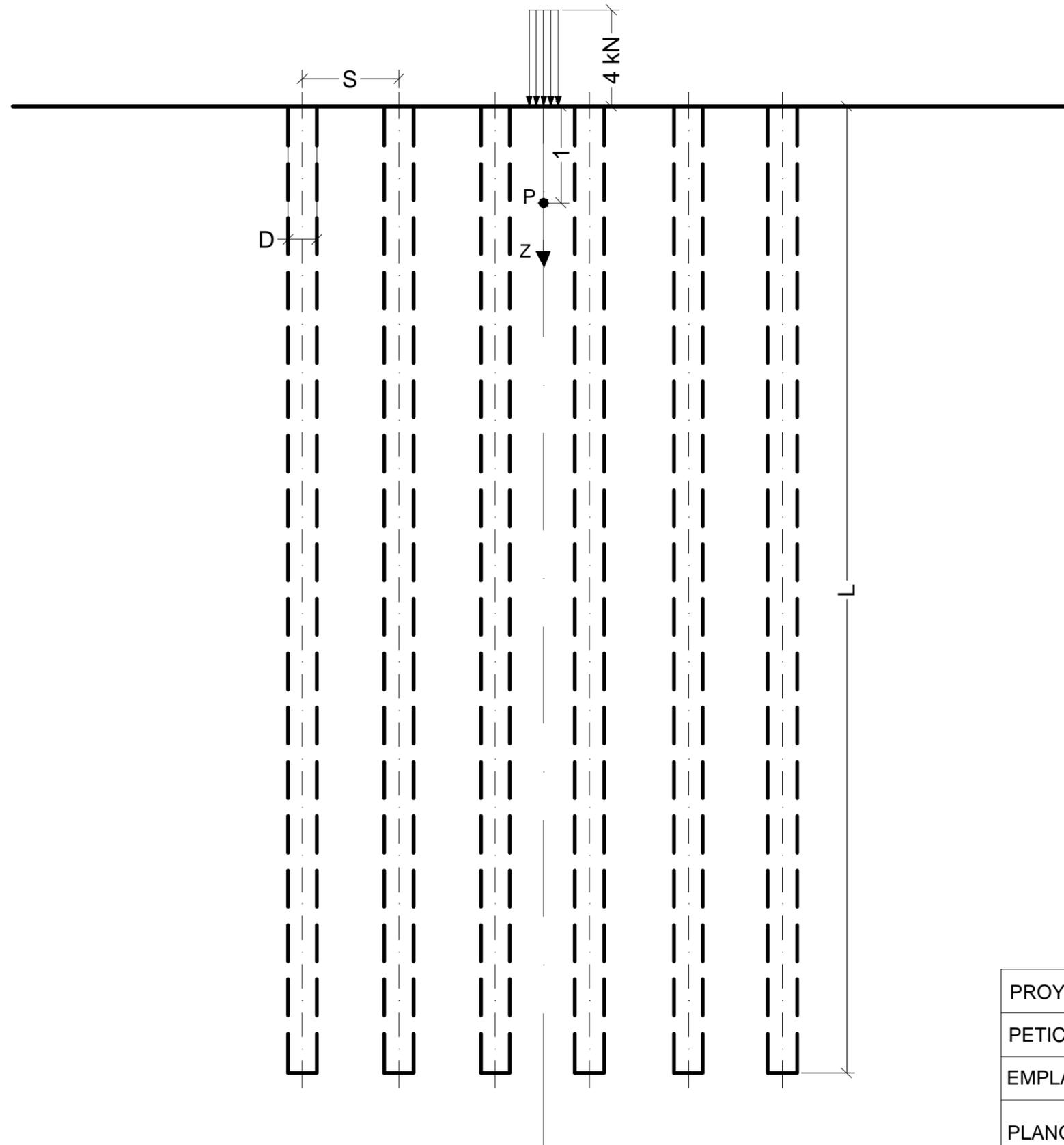


LEYENDA	
	Pilotes de HM-35
	Zona de aplicación de la carga. Tamaño: 0,3x0,3m ²

Parámetros calculados. Todas las combinaciones posibles siempre que se cumpla $S/D \geq 2$	
Estudio paramétrico. Cs (m/s)	80; 120; 160
Estudio de aplicación. Cs (m/s)	80
S (m)	0,5; 1; 2; 3; 4; 5
D (m)	0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,75; 1
L (m)	2, 4, 6, 8, 10

Configuraciones elegidas - Estudio de aplicación				
D (m)	L (m)	S (m)	u0/up	Costepilote/A
0,3	10	1	1,78	118,27
0,2	8	1	1,56	66,50
0,2	4	1	1,29	52,21

PROYECTO	ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL SUELOS ARMADOS CON TÉCNICA DE PILOTAJE. APLICACIÓN EN TERRENOS DE RELLENO EN GRAN CANARIA.			
PETICIONARIO	ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES Y CIVILES DE LA ULPGC			
EMPLAZAMIENTO	AVENIDA FINNAIR, SAN BARTOLOMÉ DE TIRAJANA, GRAN CANARIA			
PLANO	VISTA EN PLANTA DE LA CONFIGURACIÓN DE PILOTES ESTUDIADA			
Escala: 1:30 D=0,3 m S=1 m	Autor: Eduardo Rodríguez Galván	Firma:	Fecha de edición: 21/04/2020 Formato: A3	Nº: 2



LEYENDA	
●	Punto P(0,0,1) donde se calcula la solución

Propiedades del suelo		
Estudio paramétrico		
Cs (m/s)	80; 120; 160	Suelos blandos con menor o mayor cohesión.
ρ (kg/m ³)	1800	Gravas, arenas, limos y arcillas (suelos heterogéneos).
v	0,4	Arcillas blandas normalmente consolidadas.
Estudio de aplicación		
Cs (m/s)	80	Suelo blando poco cohesivo.
ρ (kg/m ³)	1800	Gravas, arenas, limos y arcillas (suelos heterogéneos).
v	0,3	Arenas y suelos granulares.

Propiedades de los pilotes - HM-35/F/12/I	
E (N/m ²)	3 e10
ρ (kg/m ³)	2500
v	0,2

PROYECTO	ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL SUELOS ARMADOS CON TÉCNICA DE PILOTAJE. APLICACIÓN EN TERRENOS DE RELLENO EN GRAN CANARIA.		
PETICIONARIO	ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES Y CIVILES DE LA ULPGC		
EMPLAZAMIENTO	AVENIDA FINNAIR, SAN BARTOLOMÉ DE TIRAJANA, GRAN CANARIA		
PLANO	VISTA EN ALZADO/PERFIL DE LA CONFIGURACIÓN DE PILOTES ESTUDIADA		
Escala: 1:50 D=0,3 m S=1 m L=10 m	Autor: Eduardo Rodríguez Galván	Firma:	Fecha de edición: 21/04/2020 Formato: A3
			Nº: 3